



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VÝPOČET ZATÍŽENÍ A KONSTRUKČNÍ NÁVRH ŘÍZENÍ

LOAD CALCULATION AND DESIGN OF CONTROL SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Lontras

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Martin Lontras**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výpočet zatížení a konstrukční návrh řízení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je výpočet zatížení a konstrukční návrh systému řízení malého dvoumístného letounu v tandemovém uspořádání.

Cíle diplomové práce:

- výpočet zatížení
- vyřešení kinematiky řízení
- konstrukční návrh řízení
- pevnostní kontrola

Seznam doporučené literatury:

ČALKOVSKÝ, A., PÁVEK, J. Konstrukce a pevnost letadel I. Brno, 1986.

PÍŠTĚK, A., GRÉGR, O., KAHÁNEK, V., BÖHM, R. Pevnost a životnost letadel. Brno, 1987.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá systémem řízení dvoumístného letounu kategorie CS-23 Level 2. Nejprve jsou provedeny výpočty zatížení jednotlivých řídicích ploch s využitím postupu uvedeného ve starším znění předpisu CS-23. Toto zatížení je přes mechanismus řízení přepočteno na řídicí prvky v kabině pilotů. Výsledné síly na řídicích prvcích jsou porovnány s požadavkem předpisu a proto, že těmto požadavkům vyhovují není nutná další úprava. I přes to jsou dále navrženy možnosti úpravy řízení pro případ, že by při dalším vývoji letounu narostla vnější zatížení. V závěru je provedena pevnostní kontrola všech částí tras řízení.

ABSTRACT

This thesis deals with the control system of two-seater aircraft corresponding to CS-23 Level 2. First load calculations of each control surface are performed using the proses described in previous CS-23 regulation. This load is calculated trough the steering mechanism to control elements in cockpit. The resulting forces on the control elements are compared with the requirements in CS-23. Because the steering forces meets requirements is not necessary to propose changes in steering kinematics. However, there are further suggested ways of adjusting the control in case the external load would increase during further development of the airplane. At the end, the strength calculation of entire mechanism is preformed.

KLÍČOVÁ SLOVA

Letoun, zatížení, řízení, řídicí plochy, CS-23, TL-ULTRALIGHT, TL Trainer.

KEYWORDS

Aircraft, load, control system, control surfaces, CS-23, TL-ULTRALIGHT, TL Trainer.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LONTRAS, M. Výpočet zatížení a konstrukční návrh řízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 120 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod dohledem vedoucího doc. Ing. Ivo Jebáčka, Ph.D., a s použitím uvedených zdrojů.

V Brně, dne 25.5. 2018

.....
Martin Lontras

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své práce doc. Ing. Ivo Jebáčkovi, Ph.D. za spolupráci při psaní této práce.
Děkuji také své rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

OBSAH

1	Úvod.....	12
2	Definice.....	13
3	Letoun TL Trainer [5]	15
3.1	Popis	15
3.2	Zařazení letounu z hlediska předpisů [2].....	16
3.3	Letová obálka	16
4	Zatížení řídicích ploch	17
4.1	Požadavky předpisu	17
4.2	Zjednodušená kritéria zatížení dle CS-23 Dodatek A	17
4.3	Obecný postup výpočtu zatížení kormidel	19
4.3.1	Úvod.....	19
4.3.2	Postup.....	19
4.4	Zatížení křidélek	23
4.4.1	Popis křidélek.....	23
4.4.2	Postup výpočtu	24
4.4.3	Výsledky.....	26
4.5	Zatížení vyvažovací plošky křidélek	27
4.5.1	Popis vyvažovací plošky křidélek	27
4.5.2	Postup výpočtu	27
4.5.3	Výsledky.....	29
4.6	Zatížení výškového kormidla	30
4.6.1	Popis výškového kormidla	30
4.6.2	Postup výpočtu	30
4.6.3	Výsledky.....	33
4.7	Zatížení vyvažovacích plošek VK.....	34
4.7.1	Popis vyvažovací plošky křidélek	34
4.7.2	Postup výpočtu	34
4.7.3	Výsledky.....	34
4.8	Zatížení směrového kormidla	36
4.8.1	Popis směrového kormidla	36
4.8.2	Postup výpočtu	36
4.8.3	Výsledky.....	37
4.9	Zatížení vztlačových klappek.....	38

4.9.1	Popis vztakových klapek.....	38
4.9.2	Postup výpočtu	39
4.9.3	Výsledky.....	40
4.10	Shrnutí výsledků	41
5	Zatížení systému řízení	42
5.1	Úvod	42
5.2	Zatížení trasy řízení křidélek	43
5.2.1	Popis trasy řízení křidélek	43
5.2.2	Uzel 1	43
5.2.3	Uzel 2	47
5.2.4	Uzel 3	48
5.2.1	Uzel 4	51
5.2.2	Uzel 5	53
5.3	Zatížení trasy řízení vyvažovací plošky křidélek	55
5.3.1	Popis trasy řízení vyvažovací plošky křidélek	55
5.3.2	Postup výpočtu	55
5.4	Zatížení trasy řízení výškového kormidla	57
5.4.1	Popis trasy řízení výškového kormidla	57
5.4.2	Uzel 1	58
5.4.3	Uzel 2	60
5.4.4	Uzel 3	63
5.4.1	Uzel 4	65
5.1	Zatížení trasy řízení vyvažovacích plošek výškového kormidla	67
5.1.1	Popis trasy řízení vyvažovacích plošek výškového kormidla	67
5.1.2	Postup výpočtu	67
5.2	Zatížení trasy řízení směrového kormidla	68
5.2.1	Popis trasy řízení směrového kormidla	68
5.2.2	Uzel 1	69
5.2.3	Uzel 2 – levá strana	72
5.2.4	Uzel 3 – levý zadní pedál	75
5.3	Zatížení trasy řízení vztakových klapek	77
5.3.1	Popis trasy řízení vztakových klapek	77
5.3.1	Postup výpočtu	77
5.4	Shrnutí výsledků	77
6	Modifikace tras řízení	78
6.1	Křídélka	79
6.2	Výškové kormidlo	79

6.3	Směrové kormidlo	79
7	Pevnostní kontrola.....	80
7.1	Požadavky předpisu	80
7.2	Trubková táhla	80
7.2.1	Výpočet	80
7.2.2	Výsledky.....	82
7.3	Vidlice, oka a jejich spoje.....	82
7.3.1	Výpočet	82
7.4	Páky	84
7.5	Lana	86
7.6	Trasa řízení klapek.....	86
7.6.1	Výpočet	86
7.6.2	Výsledky.....	88
8	Závěr.....	89

1 ÚVOD

Firma TL-ULTRALIGHT, se sídlem v Hradci Králové vyrábí malé, celokompozitové letouny kategorie UL a LSA [1]. Současnou snahou tohoto výrobce je proniknutí do kategorie větších dvoumístných letounů, certifikovaných dle předpisové báze CS-23 a to nejprve modifikací stávajících letounů.

K modifikaci byl vybrán nejnovější typ letounu TL Stream, což je ultralehký stroj s tandemovým uspořádáním sedaček, klasické koncepce. Nový letoun ponese název TL Trainer. Modifikace spočívá primárně ve zlepšení letových výkonů, tj. zejména zvýšení rychlosti letu. K dosažení tohoto cíle je nutné provést remotorizaci, a s ní spojené, zesílení konstrukce, s čímž bude souviset zvýšení celkové hmotnosti. Je však kladen důraz na co nejmenší zásahy do aerodynamického uspořádání a konstrukce.

Tato práce se přestavbou letounu TL Stream zabývá z hlediska systému řízení. Nejprve je nutné vypočítat zatížení řídicích ploch a ověřit další požadavky předpisu CS-23 [2], [3]. Vzhledem ke zvýšení rychlosti leu a maximální vzletové hmotnosti se očekává, nárůst aerodynamického zatížení, a tedy zvýšení řídicích sil.

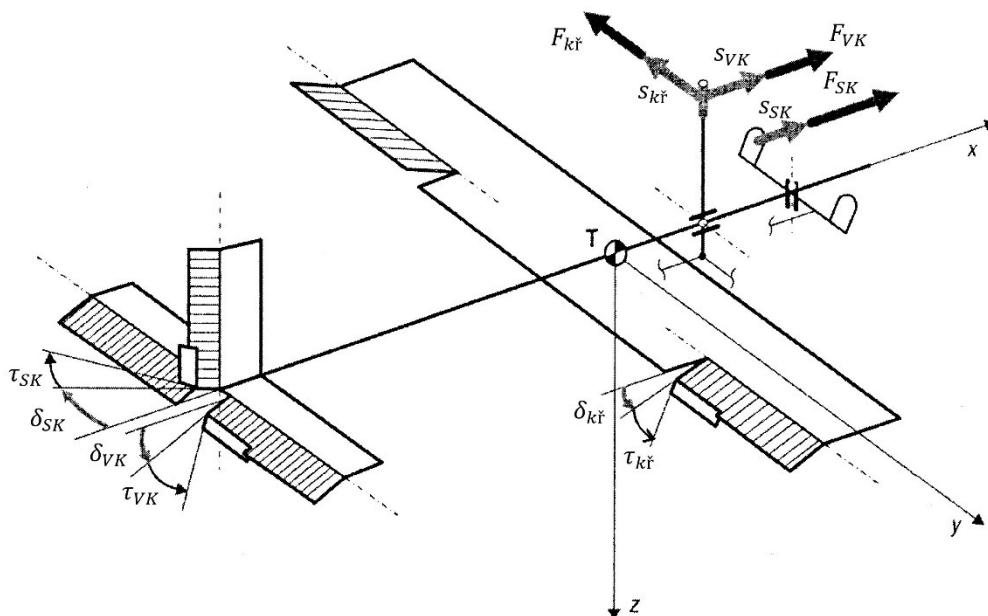
V případě, že vypočtené řídicí síly překročí hodnoty požadované předpisem, provede se návrh změny kinematiky. K tomuto však oproti očekávání nedošlo.

V závěru je třeba provést pevnostní kontrolu celého systému řízení pro zvýšená vnější zatížení. Protože systém řízení je mechanický a obsahuje pouze jednoduché součásti, je k tomuto možné použít postupy obecné pružnosti a pevnosti.

2 DEFINICE

Pro přehlednost definujeme na úvod některé podstatné pojmy v souladu s publikací [4], která vychází z normy ČSN 31 201 pro mechaniku letu:

- (aerodynamické) Orgány řízení – kormidla (řídící plochy):
 - hlavní (primární) – křídélka, výškové kormidlo, směrové kormidlo,
 - vedlejší (sekundární) – vyvažovací plošky, vztlakové klapky.
- Řídidla – ovládací prvky kormidel, umístěné v kabině pilota:
 - řídicí páka – ovládání křidélek a výškového kormidla,
 - pedály – ovládání směrového kormidla.
- Trasa řízení – mechanismus uvnitř letounu, který propojuje řídila a kormidla a zajišťuje přenos sil a momentů mezi nimi.
- Řídící síly – síly, kterými pilot působí na řídidla.
- Řídící veličiny – výchylky kormidel a řididel a řídící síly.
- Kladné směry – tak jak jsou uvedeny na Obr. 2.1:
 - F – řídící síly,
 - s – (lineární) výchylky řididel,
 - δ – (úhlové) výchylky kormidel,
 - τ – (úhlové) výchylky vyvažovacích plošek.
- Závěsové momenty, kladné směry:
 - Křídélka, VP křidélek, VK, VP VK, klapky – moment je způsoben silou, která působí prosti směru osy z
 - SK – ve směru kladné výchylky
- Souřadný systém – dle Obr. 2.1:
 - x – ve svislé rovině symetrie, ve směru letu
 - y – do pravého křídla,
 - z – dolů.

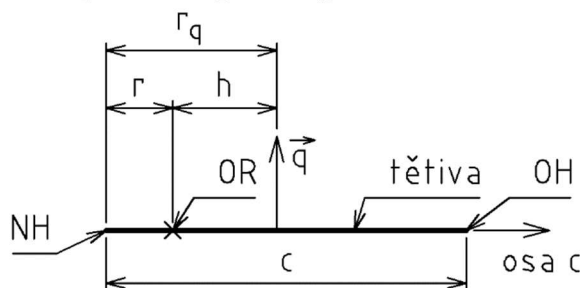


Obr. 2.1: Definice kladných směrů výchylek a sil (pozor, kladná výchylka řididla způsobí zápornou výchylku příslušné řídící plochy) [4]

Pozn.: Vztahové klapky, které nejsou na Obr. 2.1 uvedeny, se vychylují směrem dolů, takže kladnou výchylku δ_{kl} uvažujeme ve stejném směru jako u křidélek a VK.

Následující již není v souladu s publikací [4].

- Pomocný souřadný systém pro popis kormidla:
 - y' – rovnoběžně s osou y , počátek v kořeni křídélka,
 - y^* – rovnoběžně s osou y , počátek v kořeni výškového kormidla,
 - z' – ve směru od kořene NH směrového kormidla, počátek v kořeni SK,
 - c – ve směru tětiny (od NH k OH), počátek v kořenovém bodě NH (Obr. 2.2).
- Souřadnice bodů na kormidle, dle Obr. 2.2:
 - r – vzdálenost NH a OR,
 - r_q – vzdálenost HN a působiště q ,
 - h – vzdálenost působiště q a OR (tj. rameno závěsového momentu od q).



Obr. 2.2: Definice některých rozměrů kormidla (značky rozměrů jsou v dalším textu doplněny o indexy příslušných kormidel)

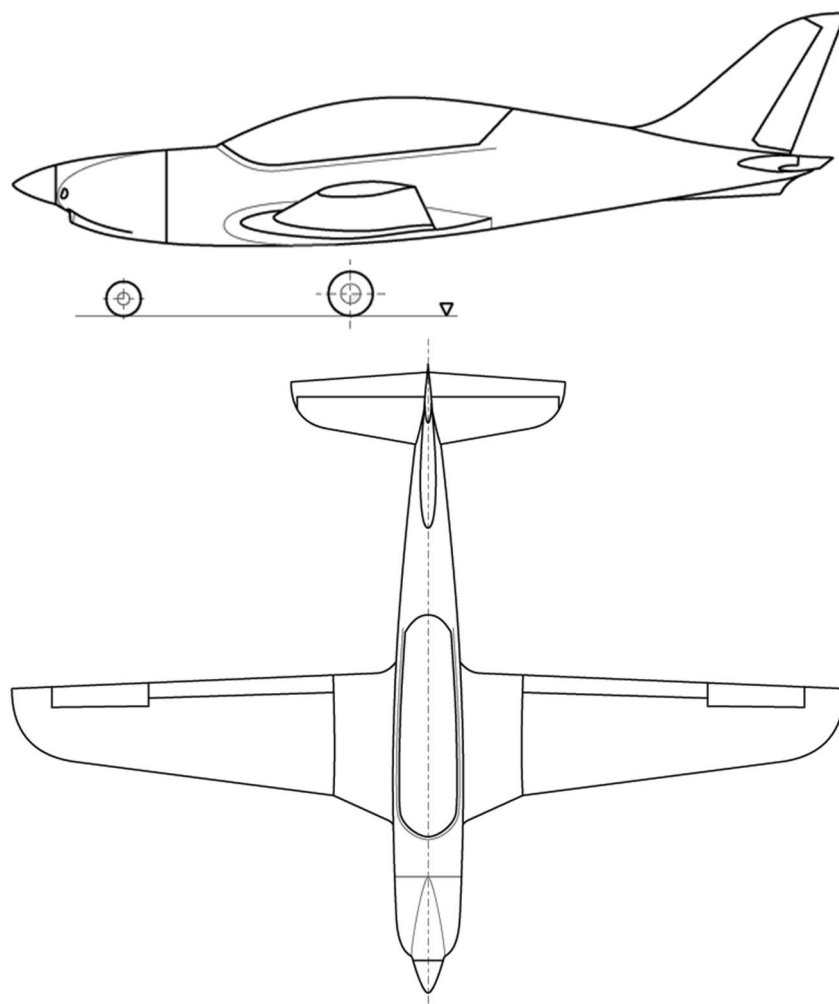
Pozn.: Křídélka jsou vybavena odlehčovacími ploškami, modifikované označení souřadnic pro tento případ je uvedeno na Obr. 4.7.

- Některé zkratky, indexy:
 - HN – náběžná hrana,
 - OH – odtoková hrana,
 - OR – osa rotace
 - 0 – kořen kormidla, křídla, ...
 - f – konec kormidla, křídla, ...
 - k – křídlo,
 - VOP – vodorovné ocasní plochy,
 - SOP – svislé ocasní plochy,
 - kř – křídélko,
 - kl – klapka,
 - SK – směrové kormidlo,
 - VK – výškové kormidlo,
 - VP – vyvažovací ploška,
 - OP – odlehčovací ploška.

3 LETOUN TL TRAINER [5]

3.1 Popis

Letoun TL Trainer vychází z letounu TL Stream. Vnější rozměry a tvary jsou stejné, viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Muška TL Trainer (převzato z TL Stream) [6]

Jedná se o celkompozitový samonosný dolnoplošník s tandemovým uspořádáním sedadel a zatahovacím podvozkem příďového typu. Konstrukce využívá zejména uhlíkových vláken. Stroj bude vybaven turbovrtulovým motorem. Základní údaje o letounu jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Základní údaje o letounu

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Max. vzletová hmotnost	m_{TOW}	800	[kg]
Rozpětí	b_k	9	[m]
Délka	l	6,785	[m]
Výška	h	2,475	[m]
Plocha křídla	S	9,962	[m ²]

3.2 Zařazení letounu z hlediska předpisů [2]

Výrobce se rozhodl tento letoun certifikovat dle předpisu CS-23 Amendment 5. Letoun svými parametry spadá do kategorie Level 2 (maximální vzletová hmotnost 8618 kg a 2 sedadla) [7].

Tato nejnovější verze předpisu však uvádí pouze obecné zásady, nikoliv návrhové postupy. Výpočet zatížení a pevnostní kontrola jsou proto provedeny dle starší verze předpisu CS-23 Amendment 3, kategorie Cvičná (Utility). Kategorie je omezena v kapitole CS23.1(a)(1) hmotností 5670 kg a počtem sedadel 9. Tyto parametry TL Trainer splňuje hodnotami 800 kg, resp. 2 sedadla.

3.3 Letová obálka

Vypočtená letová obálka dle kapitol CS23.321 až CS23.341 je v příloze (Příloha A). Pro další postup je potřebná pouze hodnota maximálního kladného násobku:

$$n_1 = 4,4.$$

4 ZATÍŽENÍ ŘÍDICÍCH PLOCH

Výpočet zatížení je proveden v souladu s předpisem CS-23, Dodatek A – Zjednodušená kritéria návrhových zatížení pro konvenční jednomotorové letouny o maximální hmotnosti 2722 kg nebo méně [2].

V následujících kapitolách jsou uvedeny stručné charakteristiky řídicích ploch, detailní popis, potřebný pro další výpočty je uveden v příloze (Příloha C).

Pro potřeby této práce poskytl výrobce letounu 3D model, ze kterého byly odečteny příslušné rozměry.

Všechny řídicí plochy, kromě vztlakových klapek, mají symetrický profil. Křídlo i VOP mají vzepětí 5° resp. -3° . Předpis neuvádí žádná omezení pro vzepětí při použití tzv. zjednodušených kritérií návrhových zatížení, proto budeme tyto hodnoty považovat za zanedbatelné. Při zjišťování rozměrů budeme používat kolmý průmět příslušného kormidla do vodorovné roviny.

4.1 Požadavky předpisu

Předpis CS-23 Amdt. 5 uvádí pouze obecné požadavky na zatížení letounu v kapitolách 23.2210, 23.2215, 23.2225, 23.2230 a 23.2300. Ve stručnosti lze tyto požadavky shrnout:

- je třeba určit tlakové zatížení které může vzniknout za letu,
- je třeba určit zatížení konstrukce při všech možných provozních podmínkách,
- velikost a rozložení těchto zatížení musí být založeno na zavedených fyzikálních principech.

Aby bylo vyhověno těmto požadavkům, provede se výpočet zatížení řídicích ploch dle starší verze předpisu CS-23 Amdt. 3, který uvádí kompletní postup určení zatížení řídicích ploch.

Další části předpisu (23.2135, 23.2300) se týkají říditelnosti letounu a letových vlastností. Kontrola dosažení těchto cílů není náplní této práce, proto předpokládáme, že jsou splněny.

4.2 Zjednodušená kritéria zatížení dle CS-23 Dodatek A

Předpis CS-23 Amdt. 3 umožňuje použít tzv. zjednodušená kritéria návrhových zatížení, postup je uveden v Dodatku A tohoto předpisu. Pro aplikaci tohoto dodatku musí být splněna kritéria dle Tab. 4.1 a Tab. 4.2.

Tab. 4.1: Podmínky pro užití zjednodušených kritérií návrhových zatížení (část předpisu A23.1)

Požadavek předpisu			TL Trainer	
Předpis A23.1 ...	Údaj	Hodnota	Hodnota	Splněno
(a)	hmotnost	max. 2722 kg	800 kg	✓
(a) (1)	počet motorů	max. 1	1	✓
(a) (1)	typ motoru	turbínový zakázán	turbínový	✗
(a) (2)	křídlo umístěné blíže k těžišti než k ocasním plochám		*	✓
(a) (3)	úhel šípů křídla v ¼ třetiny	max. $\pm 15^\circ$	0°	✓
(a) (4)	křídlo vybaveno křídélky, klapkami		obojí	✓
(a) (5)	štíhlost hl. křídla	min. 7	8,1	✓
(a) (6)	štíhlost VOP	max. 4	1,7	✓
(a) (7)	objem. součinitel VOP	min. 0,34	0,56	✓
(a) (8)	štíhlost SOP	max. 2	0,7	✓
(a) (9)	plocha základny SOP ku ploše základny křídla	$S_{SOP} \leq 0,1 S_k$	$S_{SOP} = 0,07 S_k$	✓
(a) (10)	profily VOP a SOP	symetrické	symetrické	✓

* těžiště leží v rozsahu střední aerodynamické třetiny

Tab. 4.2: Podmínky pro užití zjednodušených kritérií návrhových zatížení – zákazy (část předpisu A23.1)

Požadavek předpisu			TL Trainer	
Předpis A23.1 ...	Údaj	Zakázáno	Hodnota	Splněno
(b) (1)	uspořádání nosných ploch	kachna, tandem, nosné plochy o malé vzdálenosti, bez-ocasé	klasické	✓
(b) (2)	uspořádání křídel	víceplošnickové	1-plošník	✓
(b) (3)	uspořádání ocas. ploch	T, V, X	klasické	✓
(b) (4)	půdorys křídla	delta	obdélník	✓
(b) (4)	typ křídla	štěrbinové	klasické	✓
(b) (5)	jiné koncové úpravy křídel	winglety a jiné koncové úpravy křídel	**	✓

** mírné zahnutí konce křídla letounu TL Trainer považujeme za zanedbatelné

Letoun TL Trainer vyhovuje výše uvedeným požadavkům s výjimkou zástavby turbovrtulového motoru. Předpis CS-23 ve znění Amendment 5 dovoluje otevřenější přístup při návrhu letounu. S odkazem na toto znění, tedy považujeme nesplnění této jediné podmínky za nezávažné. Samozřejmě není zřejmé, jak má turbovrtulová pohonná jednotka ovlivnit zatížení kormidel. Cílem této práce zároveň není co nejpřesnější výpočet aerodynamického zatížení, toho může výrobce dosáhnout pomocí CFD simulace, která je však nad rámec. Pro předběžnou kontrolu řídicích sil budeme tento postup považovat za dostatečně přesný.

4.3 Obecný postup výpočtu zatížení kormidel

4.3.1 Úvod

Předpis z hlediska zatížení řídicích ploch stanovuje:

- průměrné tlakové zatížení – tj. velikost tlaku, který je konstantní po celé ploše,
- modelové rozložení tlaku po délce tělivy,
- rozložení tlaku po rozpětí – úměrné délce tělivy.

V příloze (Příloha B) jsou odvozeny zkrácené vztahy pro výpočet těžiště pravoúhlého lichoběžníku, se kterým se často pracuje. Vztah pro numerickou integraci lichoběžníkovou metodou je uveden na stejném místě.

V kapitolách 4.4 až 4.9 je důsledně dodržováno číslování kroků výpočtu dle kapitoly 4.3.2.

V kapitolách 4.4 až 4.9 jsou uvedeny pouze výsledky podstatné pro další postup, tabulky mezi-výpočtů jsou v příloze (Příloha D).

4.3.2 Postup

Postup výpočtu zatížení kormidel je následující:

1) **Zvolení řezů** (i) kormidla ve směru tělivy – v místech, kde se skokově mění délka tělivy, tj.:

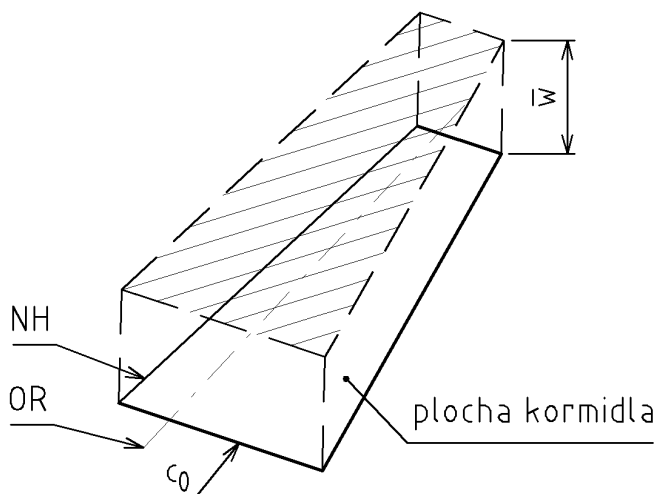
- kořen ($i = 0$),
- konec ($i = f$),
- části s/bez vnitřního aerodynamického vyvážení (pouze u křidélek).

2) **Výpočet průměrného tlakového zatížení**, které má konstantní velikost po celé ploše kormidle, dle vztahu (znázornění viz Obr. 4.1):

$$\bar{w} = konst_1 + konst_2 \cdot \left(n_1 \cdot \frac{W}{S} \right)^{konst_3} \quad (4.1)$$

kde:

$konst_{1, 2, 3}$... konstanty, hodnoty jsou určeny předpisem pro každý typ kormidla [-],
n_1	... max. kladný provozní násobek [-],
W	... max. hmotnost letounu [lb],
S	... plocha křídla [ft ²].

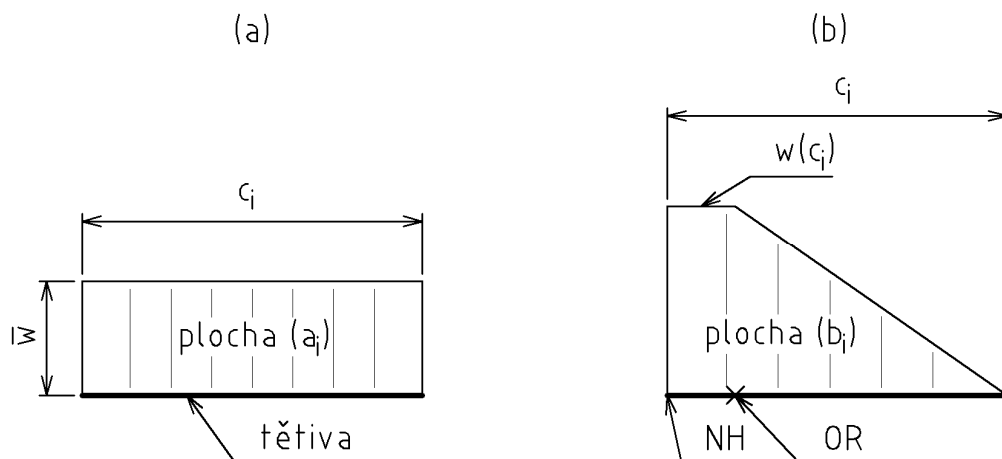


Obr. 4.1: Rozložení průměrného tlakového \bar{w} zatížení po ploše kormidla

- 3) **Přerozdělení \bar{w} po délce tětiny** na modelové tlakové zatížení $w = f(c)$ – předpis určuje tvar modelového tlakového zatížení pro každý typ kormidla. Přerozdělení provedeme pouze ve vybraných řezech (i). Operace spočívá ve stanovení silové ekvivalence zátěžných obrazců dle Obr. 4.2, kdy musí platit:

$$plocha(a_i) = plocha(b_i) \quad (4.2)$$

Z tohoto vztahu vyjádříme ty hodnoty modelového zatížení w , které definují příslušný zátěžný obrazec.



Obr. 4.2: Rozložení tlakového zatížení po délce tětiny (a) – průměrné, (b) – modelové (pro případ křídélka)

- 4) **Výpočet velikosti a polohy výslednice q** tlakového zatížení $w(c)$ pro zvolené řezy (Obr. 4.3).

a) Velikost výslednice q_i – numerickou integrací plochy pod křivkou tlaku $w(c)$:

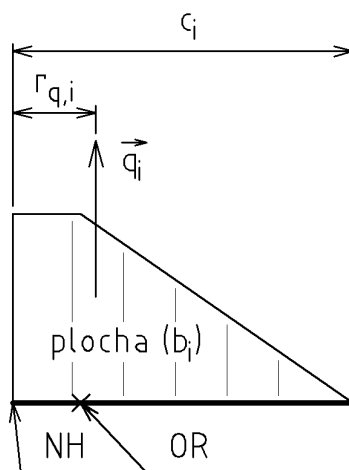
$$\int w(c_i) \cdot dc_i = q_i \approx plocha(b_i) \quad (4.3)$$

Z rovnic (4.2) a (4.3) plyne, že výslednici q , lze rovněž vyjádřit jednodušeji, pomocí Obr. 4.2 (a):

$$q_i \approx plocha(b_i) = plocha(a_i) = \bar{w} \cdot c_i \quad (4.4)$$

Pozn.: Z rovnice (4.4) plyne, že q_i roste, s rostoucí délkou tětiny c_i .

b) Poloha výslednice q_i (tj. vzdálenost $r_{q,i}$) – v těžišti zátěžného obrazce (v těžišti plochy (b)), dle Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Určení výslednice modelového zatížení na tětině

Pozn.: Je třeba si uvědomit, že výslednice q reprezentuje jeden bod liniového zatížení [N/m], nikoliv sílu [N]. Je to proto, že křivka $w(c_i)$ na Obr. 4.2 (a) reprezentuje tlak [Pa].

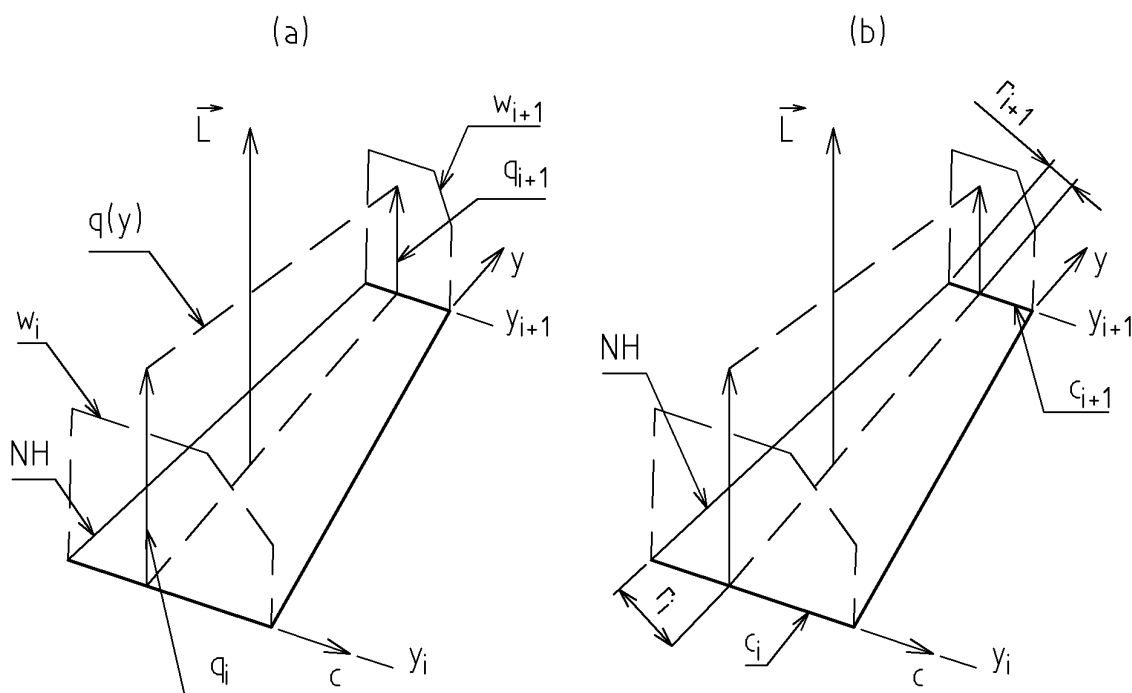
5) Výpočet velikosti a polohy výslednice L_i liniového zatížení q_i mezi dvěma sousedními řezy.

- a) Velikost výslednice L_i – numerickou integrací plochy pod křivkou liniového zatížení $q(y)$, dle Obr. 4.4:

$$\int q(y) \cdot dy = L \approx \text{plocha pod } q(y) \quad (4.5)$$

Protože plocha pod $q(y)$ má pro všechna kormidla tvar pravoúhlého lichoběžníku, lze psát:

$$L_i \approx \text{plocha pod } q(y) = \frac{1}{2} \cdot (y_{i+1} - y_i) \cdot (q_{i+1} + q_i) \quad (4.6)$$



Obr. 4.4: Výpočet velikosti výslednice liniového zatížení $q(y)$ – zatížení (a), rozměry (b)

- b) Poloha výslednice L_i (Obr. 4.4, Obr. 4.5):

- i) Vzdálenost L_i od kořene řezu (souřadnice y_L) – v těžišti zátěžného obrazce $q(y)$. Nejprve vypočteme vzdálenost od řezu i . Protože je vždy zátěžným obrazcem pravoúhlý lichoběžník, lze psát:

$$\Delta y_{L,i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{3} \cdot \frac{q_i + 2 \cdot q_{i+1}}{q_i + q_{i+1}} \quad (4.7)$$

Vzdálenost od kořene je potom:

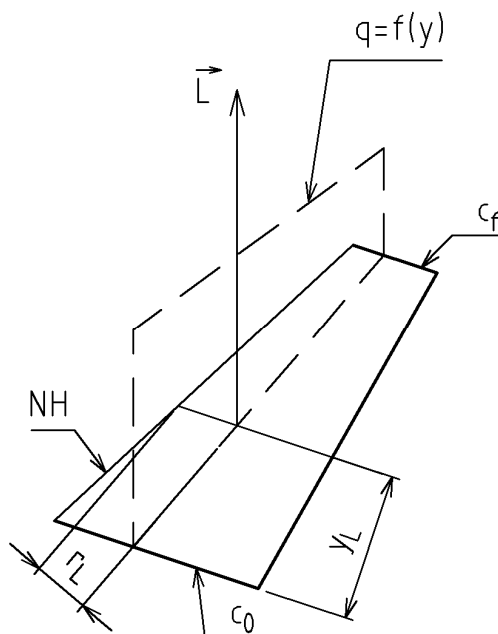
$$y_{L,i} = \Delta y_{L,i} + \sum_{n=0}^{i-1} y'_{L,n} \quad (4.8)$$

- ii) Vzdálenost L_i od NH (souřadnice $r_{L,i} = r_{q,i}(y_{L,i})$) – lineární interpolací vzdáleností r_i ve vybraných řezech v místě souřadnice y_L :

$$r_{L,i} = r_{q,i}(y_{L,i}) = r_{q,i} - \frac{r_{q,i} - r_{q,i+1}}{y_{i+1} - y_i} \cdot (y_{L,i} - y_i) \quad (4.9)$$

iii) Vzdálenost r (OH a OR) v místě souřadnice $y_{L,i}$ – lineární interpolací:

$$r(y_{L,i}) = r_i - \frac{r_i - r_{i+1}}{y_{i+1} - y_i} \cdot (y_{L,i} - y_i) \quad (4.10)$$



Obr. 4.5: Výpočet polohy výslednice liniového zatížení $q(y)$

6) Výpočet závěsového momentu.

a) Rameno závěsového momentu:

$$h_{L,i} = r_{L,i} - r_i(y_L) \quad (4.11)$$

b) Závěsový moment

Dílčí závěsový moment v každém intervalu:

$$H_i = L_i \cdot h_{L,i} \quad (4.12)$$

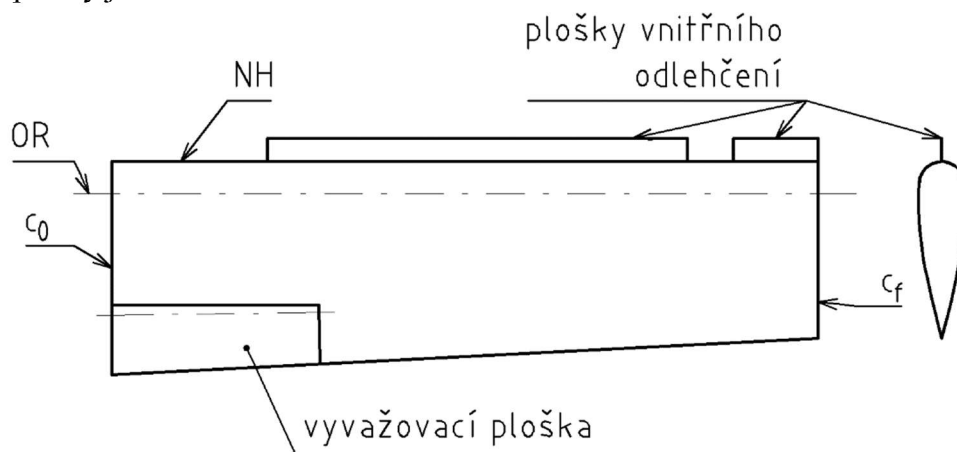
Výsledný moment potom dostaneme jako součet momentů ve všech intervalech:

$$H = \sum_{i=0}^f H_i \quad (4.13)$$

4.4 Zatížení křidélek

4.4.1 Popis křidélek

Lichoběžníkové křídélko je vybaveno ploškami vnitřního aerodynamického odlehčení. Vyvažování se uskutečňuje pomocí vyvažovací plošky v kořeni pravého křidéla. Vyvažovací ploška je rovněž vybavena ploškami vnitřního aerodynamického odlehčení. Popis křidéla a vyvažovací plošky je na Obr. 4.6 a v Tab. 4.3.

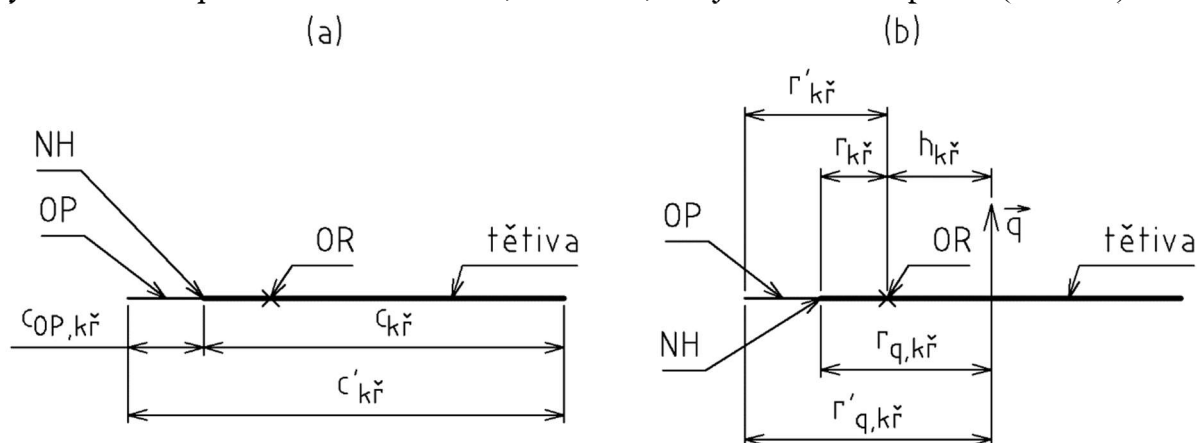


Obr. 4.6: Náčrt křidéla (pravé křídlo)

Tab. 4.3: Základní parametry křidéla

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Rozpětí	$b_{kř}$	934	[mm]
Poměrná hloubka	$\bar{c}_{kř}$	25	[%]
Plocha	$b_{kř}$	0,23	[m ²]
Výchylka	$\delta_{kř}$	12 / -25	[°]

Při výpočtu zatížení bude zohledněno vnitřní aerodynamické odlehčení tak, že délku tělvy odlehčovací plošky přičteme k délce tělvy křidéla. Zároveň zavedeme modifikovaný systém značení pro souřadnice na tělvě, v místech, kde je odlehčovací ploška (Obr. 4.7).

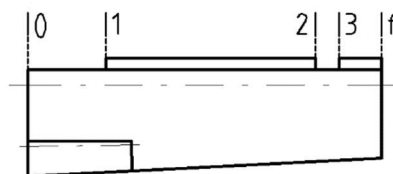


Obr. 4.7: Definice rozměrů křidéla – tělvy (a), ostatní (b)

4.4.2 Postup výpočtu

1) Volba řezů (Obr. 4.8):

- kořen ($i = 0$),
- začátek 1. části OP ($i = 1$),
- konec 1. části OP ($i = 2$),
- začátek 2. části OP ($i = 3$),
- konec ($i = f$).

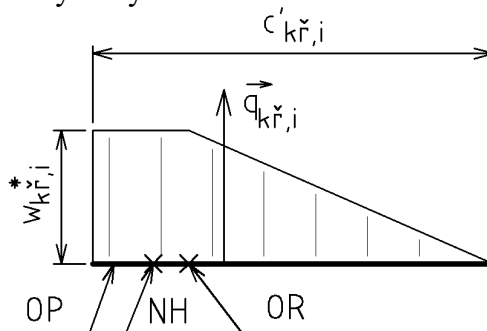


Obr. 4.8: Řezy křídélka

2) Průměrné tlakové zatížení¹:

$$\bar{w}_{kř} = 0,466 \cdot n_1 \cdot \frac{W}{S} \quad (4.14)$$

3) Přerozdělení $\bar{w}_{kř}$ po délce tětivy na modelové tlakové rozdělení² $w_{kř} = f(c)$ (Obr. 4.9). Toto provedeme pouze ve vybraných řezech.



Obr. 4.9: Modelové rozložení tlaku v řezu křídélka s uvažáním OP

Přerozdělení provedeme v souladu s rovnicí (4.2) a Obr. 4.2 a Obr. 4.9 (těžiště pravoúhlého lichoběžníku):

$$\bar{w}_{kř} \cdot c'_{kř,i} = \frac{1}{2} \cdot w_{kř,i}^* \cdot (c'_{kř,i} + r'_{kř,i}) \quad (4.15)$$

Vyjádříme maximální zatížení $w_{kř,i}^*$:

$$w_{kř,i}^* = \frac{2 \cdot \bar{w}_{kř} \cdot c'_{kř,i}}{c'_{kř,i} + r'_{kř,i}} \quad (4.16)$$

Pozn.: Rovnice (4.15) a (4.16) v dalších výpočtech nevystupují, protože výpočet těžiště zátěžného obrazce (rovnice (4.18)) se v tomto případě obejde bez velikosti $w_{kř,i}^*$. Jsou však uvedeny pro úplnost.

4) Velikosti a poloha výslednice q pro zvolené řezy (Obr. 4.3).

a) Velikost výslednice – dle rovnice (4.4):

$$q_{kř,i} = \bar{w}_{kř} \cdot c'_{kř,i} \quad (4.17)$$

b) Poloha výslednice – v těžišti zátěžného obrazce, Obr. 4.9 (těžiště pravoúhlého lichoběžníku):

$$r'_{q,kř,i} = \frac{r_{kř,i}^2 + c_{kř,i}^2 + r'_{kř,i} \cdot c'_{kř,i}}{3 \cdot (r'_{kř,i} + c'_{kř,i})} \quad (4.18)$$

¹ CS-23, Dodatek A, Obrázek A6, čára (5)

² CS-23, Dodatek A, Tabulka 2, KŘIDÉLKA III

Po odečtení délky odlehčovací plošky:

$$r_{q,kř,i} = r'_{q,kř,i} - c_{OP,kř,i} \quad (4.19)$$

5) Velikost a poloha silové výslednice L v jednotlivých intervalech.

- a) Velikost výslednice – numerickou integrací plochy pod křivkou liniového zatížení $q(y)$ (Obr. 4.4, rovnice (4.6)):

$$L_{kř,i} = \frac{1}{2} \cdot (y'_{kř,i+1} - y'_{kř,i}) \cdot (q_{kř,i+1} + q_{kř,i}) \quad (4.20)$$

- b) Poloha výslednice (Obr. 4.5):

- i) Souřadnice y_L – v těžišti zátěžného obrazce $q(y)$ (tj. těžiště lichoběžníku, rovnice (4.7)). Nejprve vzdálenost od řezu i:

$$\Delta y'_{L,kř,i} = \frac{y'_{kř,i+1} - y'_{kř,i}}{3} \cdot \frac{q_{kř,i} + 2 \cdot q_{kř,i+1}}{q_{kř,i} + q_{kř,i+1}} \quad (4.21)$$

Vzdálenost od kořene je pak:

$$y'_{L,kř,i} = \Delta y'_{L,kř,i} + \sum_{n=0}^{n=i-1} y'_{L,kř,n} \quad (4.22)$$

- ii) Souřadnice r_L – lineární interpolací vzdáleností HN a OR ve vybraných řezech (tj. vzdálenost r) pro souřadnici y_L

$$r_{L,kř,i} = r_{q,kř,i}(y'_{L,kř,i}) = r_{q,kř,i} - \frac{r_{q,kř,i} - r_{q,kř,i+1}}{y_{kř,i+1} - y_{kř,i}} \cdot (y'_{L,kř,i} - y'_{kř,i}) \quad (4.23)$$

- iii) Vzdálenost r (OH a OR) v místě souřadnice $y_{L,i}$:

$$r_{kř}(y'_{L,kř,i}) = r_{kř,i} - \frac{r_{kř,i} - r_{kř,i+1}}{y_{kř,i+1} - y_{kř,i}} \cdot (y'_{L,kř,i} - y'_{kř,i}) \quad (4.24)$$

6) Závěsový moment.

- a) Rameno:

$$h_{L,kř,i} = r_{L,kř,i} - r_{kř}(y'_{L,kř,i}) \quad (4.25)$$

- b) Dílčí závěsový moment:

$$H_{kř,i} = L_{kř,i} \cdot h_{L,kř,i} \quad (4.26)$$

- c) Celkový závěsový moment:

$$H_{kř} = \sum H_{kř,i} \quad (4.27)$$

4.4.3 Výsledky

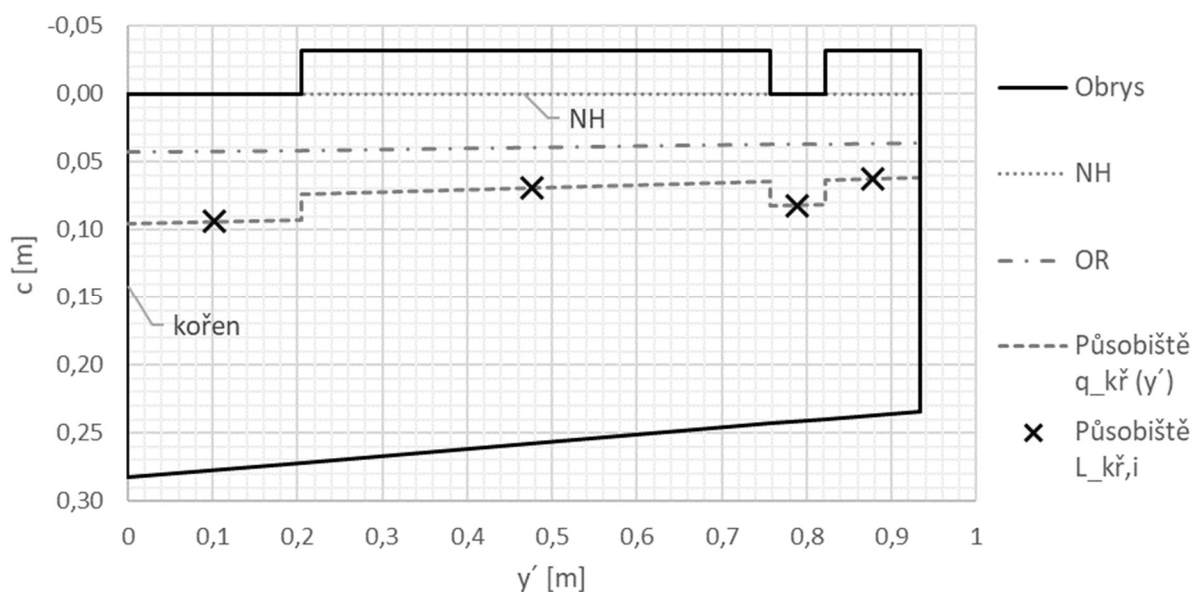
Vypočtené hodnoty jsou shrnuty na Obr. 4.10 a Obr. 4.11. Tabulka se všemi hodnotami je uvedena v příloze (Příloha D).

Závěsový moment působící na křídélko je:

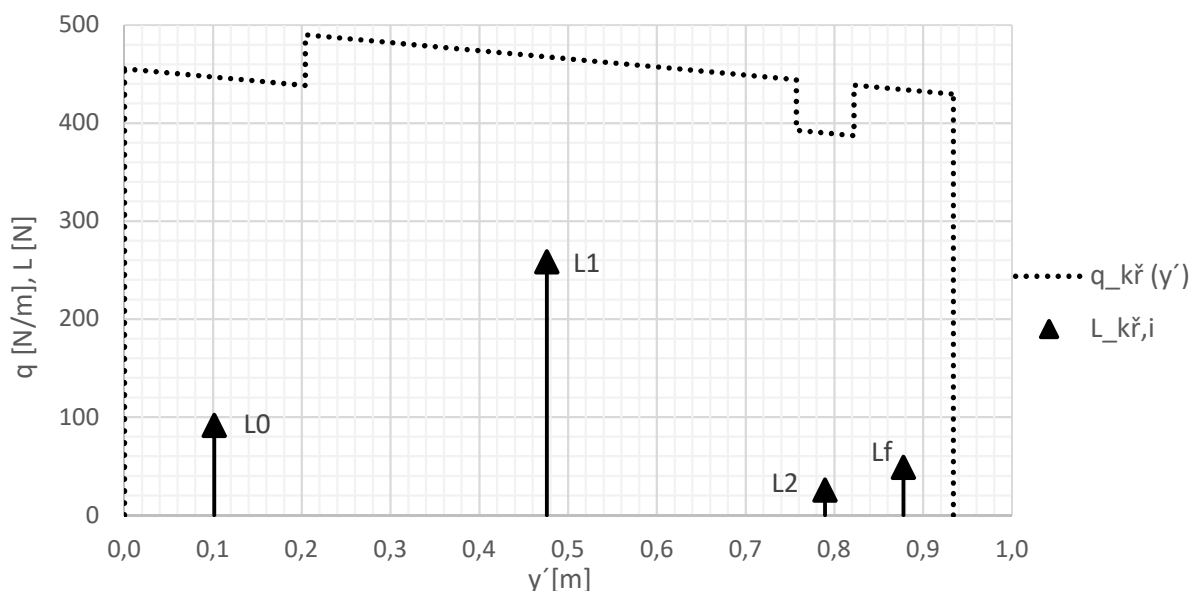
$$H_{kř} = 14,8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Pro srovnání uvedme, že závěsový moment, bez uvažování odlehčovací plošky je:

$$H'_{kř} = 18,8 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Obr. 4.10: Vypočtená geometrie křídélka



Obr. 4.11: Průběh liniového zatížení po rozpětí křídélka a velikosti a působíště sil $L_{kř,i}$ (počátek s.s. odpovídá kořeni křídélka)

4.5 Zatížení vyvažovací plošky křídélka

4.5.1 Popis vyvažovací plošky křídélka

Vyvažovací ploška pravého křídélka je vybavena ploškami vnitřního aerodynamického odlehčení. V tomto případě však odlehčení zanedbáme. Z Obr. 4.12 je patrné, že prodloužením tětiny o délku tětiny aerodyn. odlehčení dojde k nárůstu maximálního zatížení a výsledné snížení závažového momentu by mohlo být příliš vysoké. Základní parametry jsou uvedeny v Tab. 4.4.

Tab. 4.4: Základní parametry vyvažovací plošky křídélka

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Rozpětí	$b_{vp,kř}$	274	[mm]
Plocha	$b_{vp,kř}$	0,023	[m ²]
Výchylka	$\delta_{vp,kř}$	12 / -25	[°]

4.5.2 Postup výpočtu

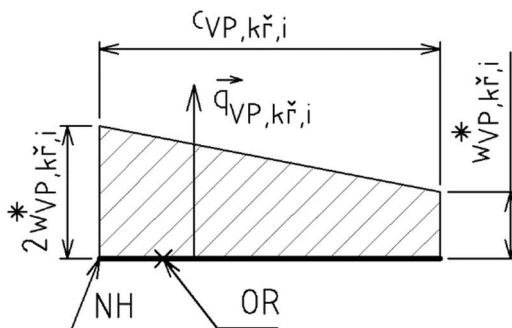
1) Volba řezů (Obr. 4.8):

- kořen ($i = 0$),
- konec ($i = f$).

2) Průměrné tlakové zatížení³:

$$\bar{w}_{VP,kř} = 0,78 \cdot n_1 \cdot \frac{W}{S} \quad (4.28)$$

3) Přerozdělení $\bar{w}_{kř}$ po délce tětiny na modelové tlakové rozdělení⁴ $w_{VP,kř} = f(c)$ (Obr. 4.12). Toto provedeme pouze ve vybraných řezech.



Obr. 4.12: Modelové rozložení tlaku v řezu vyvažovací plošky křídélka (bez uvážení OP)

Přerozdělení provedeme v souladu s rovnicí (4.2) a Obr. 4.2 a Obr. 4.12 (těžiště pravoúhlého lichoběžníku):

$$\bar{w}_{VP,kř} \cdot c_{VP,kř,i} = \frac{3}{2} \cdot w_{VP,kř,i}^* \cdot c_{VP,kř,i} \quad (4.29)$$

Vyjádříme maximální zatížení $w_{VP,kř,i}^*$ (po zjednodušení):

$$w_{VP,kř,i}^* = \frac{2}{3} \cdot \bar{w}_{VP,kř} \quad (4.30)$$

4) Velikosti a poloha výslednice q pro zvolené řezy (Obr. 4.3).

a) Velikost výslednice – dle rovnice (4.4):

³ CS-23, Dodatek A, Obrázek A6, čára (5)

⁴ CS-23, Dodatek A, Tabulka 2, KŘIDÉLKA III

$$q_{VP,kř,i} = \bar{w}_{VP,kř} \cdot c_{VP,kř,i} \quad (4.31)$$

- b) Poloha výslednice – v těžišti zátěžného obrazce, Obr. 4.12 (těžiště pravoúhlého lichoběžníku, po zjednodušení):

$$r_{qVP,kř,i} = \frac{4}{9} \cdot c_{VP,kř,i} \quad (4.32)$$

5) Velikost a poloha silové výslednice L.

- a) Velikost výslednice – numerickou integrací plochy pod křivkou liniového zatížení $q(y)$ (Obr. 4.4, rovnice (4.6)):

$$L_{VP,kř} = \frac{1}{2} \cdot (y'_{VP,kř,i+1} - y'_{VP,kř,i}) \cdot (q_{VP,kř,i+1} + q_{VP,kř,i}) \quad (4.33)$$

- b) Poloha výslednice (Obr. 4.5):

- i) Souřadnice y_L – v těžišti zátěžného obrazce $q(y)$ (tj. těžiště lichoběžníku, rovnice (4.7)):

$$y_{L,VP,kř} = \frac{y'_{VP,kř,i+1} - y'_{VP,kř,i}}{3} \cdot \frac{q_{VP,kř,i} + 2 \cdot q_{VP,kř,i+1}}{q_{VP,kř,i} + q_{VP,kř,i+1}} \quad (4.34)$$

- ii) Souřadnice r_L – lineární interpolací vzdáleností HN a OR ve vybraných řezech (tj. vzdálenost r) pro souřadnici y_L

$$\begin{aligned} r_{L,VP,kř} &= r_{q,VP,kř}(y_{L,VP,kř}) = \\ &= r_{q,VP,kř,i} - \frac{r_{q,VP,kř,i} - r_{q,VP,kř,i+1}}{y'_{VP,kř,i+1} - y'_{VP,kř,i}} \cdot (y'_{L,VP,kř} - y'_{VP,kř,i}) \end{aligned} \quad (4.35)$$

- iii) Vzdálenost r (OH a OR) v místě souřadnice $y_{L,i}$:

$$r_{VP,kř}(y_{L,VP,kř}) = r_{VP,kř,i} - \frac{r_{VP,kř,i} - r_{VP,kř,i+1}}{y'_{VP,kř,i+1} - y'_{VP,kř,i}} \cdot (y'_{L,VP,kř} - y'_{VP,kř,i}) \quad (4.36)$$

6) Závěsový moment.

- a) Rameno:

$$h_{L,VP,kř} = r_{L,VP,kř} - r_{VP,kř}(y_{L,VP,kř}) \quad (4.37)$$

- b) Závěsový moment:

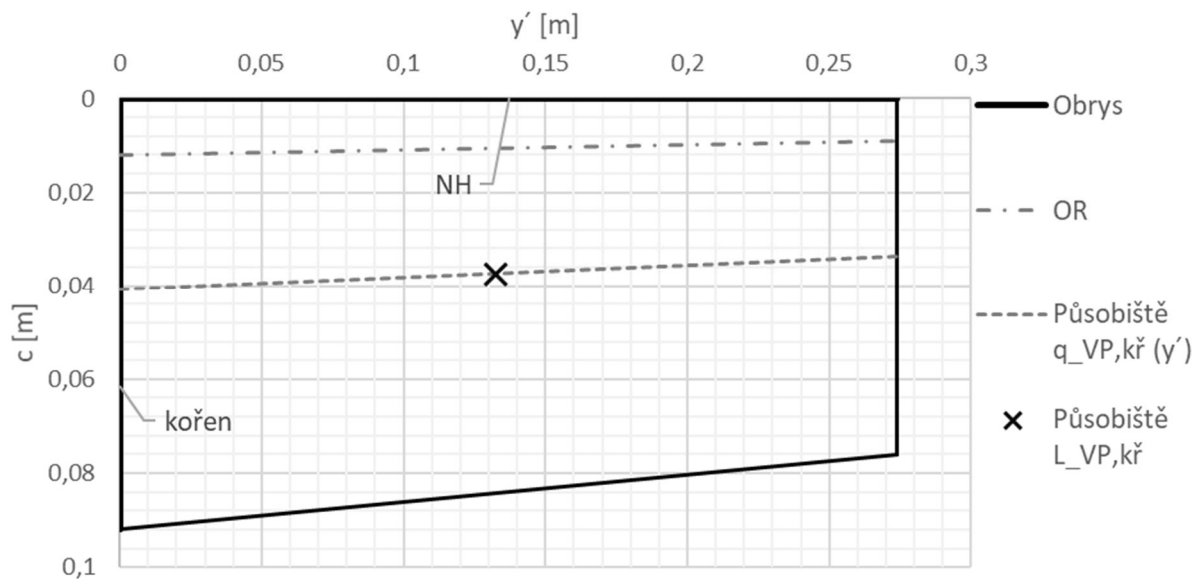
$$H_{VP,kř} = L_{VP,kř} \cdot h_{L,VP,kř} \quad (4.38)$$

4.5.3 Výsledky

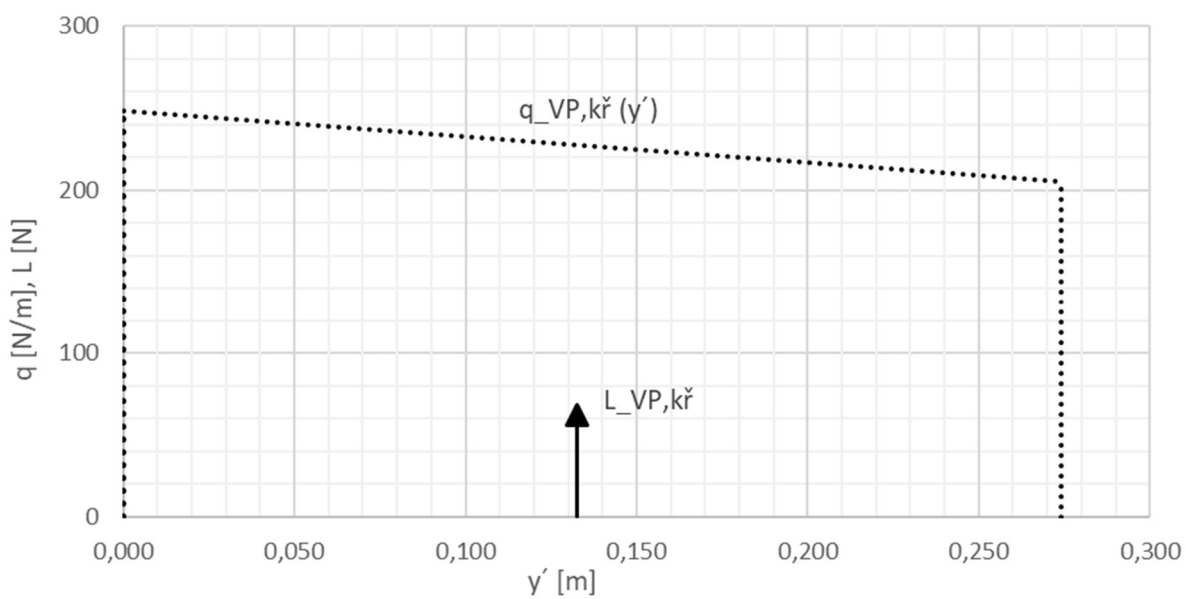
Vypočtené hodnoty jsou shrnuty na Obr. 4.13 a Obr. 4.14. Tabulky se všemi hodnotami jsou uvedeny v příloze (Příloha D).

Závěsový moment působící na vyvažovací plošku křídélka je:

$$H_{VP,kř} = 1,7 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Obr. 4.13: Geometrie vyvažovací plošky křídélka

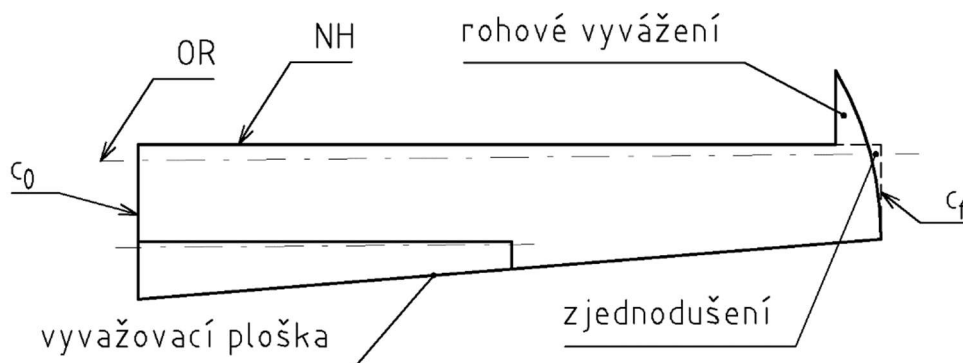


Obr. 4.14: Zatížení vyvažovací plošky křídélka

4.6 Zatížení výškového kormidla

4.6.1 Popis výškového kormidla

Výškové kormidlo má lichoběžníkový půdorys s koncovým zaoblením. Na konci kormidla je umístěna plocha rohového vyvážení a vyvažování se děje pomocí vyvažovací plošky umístěné v kořeni kormidla. Popis je na Obr. 4.15 a v Tab. 4.5. Pro zjednodušení výpočtu zatížení nebude uvažováno rohové vyvážení a oblý konec křídla bude nahrazen částí obdélníku. To lze provést, protože oba tyto předpoklady povedou ke zvýšení závěsového momentu (na rohovém vyvážení vzniká vyvažovací moment a náhradou zaobleného konce obdélníkem dojde ke zvětšení celkové plochy) a tím pádem k naddimenzování konstrukce.



Obr. 4.15: Náčrt výškového kormidla (pravá strana)

Tab. 4.5: Základní parametry VK

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Rozpětí	b_{VK}	1472	[mm]
Poměrná hloubka	\bar{c}_{VK}	35	[%]
Plocha	b_{VK}	0,53	[m ²]
Výchylka	δ_{VK}	± 25	[°]

4.6.2 Postup výpočtu

1) Volba řezů:

- kořen ($i = 0$),
- konec ($i = f$).

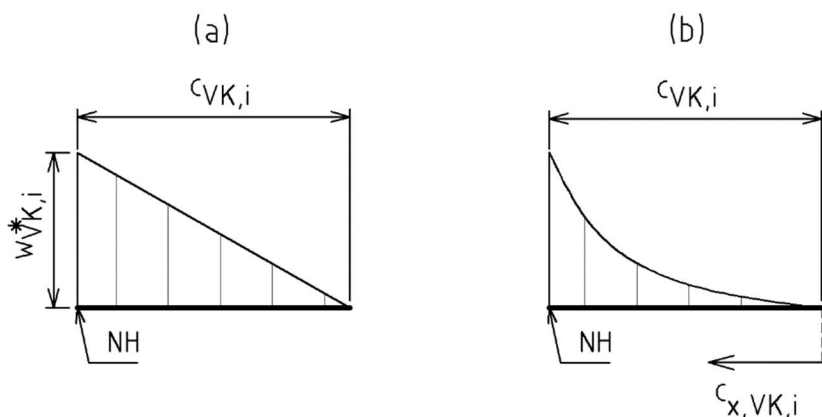
2) Průměrné tlakové zatížení⁵:

$$\bar{w}_{VK} = 4,8 + 0,534 \cdot n_1 \cdot \frac{W}{S} \quad (4.39)$$

3) Přerozdělení \bar{w}_{VK} po délce tětiny na modelové tlakové rozdělení. Toto provedeme pouze ve vybraných řezech.

V případě VK udává předpis dva případy rozložení tlaku – trojúhelníkové a parabolické (Obr. 4.16). K parabolickému rozložení je uvedeno, že se jedná o „nejnepříznivější“ rozložení, nicméně není zřejmé, zda jde o nejhorší možnost z hlediska namáhání kormidla nebo závěsového momentu, proto jsou dále uvažovány oba případy.

⁵ CS-23, Dodatek A, Obrázek A5, čára (2)



Obr. 4.16: Modelové rozložení tlaku po délce tětiny VK – trojúhelníkové (a), parabolické (b)

- a) Trojúhelníkové rozložení – vypočte se maximální hodnota na NH:

$$w_{VK,t,i}^* = 2 \cdot \bar{w}_{VP,kř} \cdot \left(3 \cdot \frac{r_{q,VOP,i}}{c_{VOP,i}} + \frac{c_{VK,i}}{c_{VOP,i}} - 1 \right) \quad (4.40)$$

Ve vztahu vystupuje hodnota $\frac{r_{q,VOP,i}}{c_{VOP,i}}$, což je relativní poloha působíště tlaku na tětině VOP. Tuto hodnotu je třeba odhadnout. Protože závěsový moment silně závisí na tomto rozměru volíme konzervativní odhad (v letectví se běžně používá hodnota 0,25):

$$\frac{r_{q,VOP,i}}{c_{VOP,i}} = 0,3$$

- b) Parabolické rozložení – je dán průběh po délce tětiny:

$$w_{VK,p,i}^*(c_{x,VK,i}) = 3 \cdot \bar{w}_{VP,kř} \cdot \left(\frac{c_{x,VK,i}}{c_{VK,i}} \right)^2 \quad (4.41)$$

kde: $c_{x,VK,i}$... souřadnice na tětině (Obr. 4.16)

Pro výpočet tohoto rozložení byl celý interval (délka tětiny) rozdělen na 100 částí.

4) Velikosti a poloha výslednice q.

- a) Velikost výslednice (trojúhelníkový průběh) dle Obr. 4.16 (a).

$$q_{VK,i} = 0,5 \cdot c_{VK,i} \cdot w_{VK,t,i}^* \quad (4.42)$$

- b) Poloha výslednice (trojúhelníkový průběh) – v těžišti zátěžného obrazce (těžiště pravoúhlého trojúhelníku):

$$r_{q,VK,t,i} = \frac{1}{3} \cdot c_{VK,i} \quad (4.43)$$

- c) Velikost a poloha výslednice (parabolický průběh) – provede se numerická integrace obdélníkovou metodou, postup je uveden v příloze u výsledků.

5) Velikost a poloha silové výslednice L (stejně pro oba typy rozložení).

- a) Velikost výslednice – numerickou integrací plochy pod křivkou liniového zatížení $q(y)$ (Obr. 4.4, rovnice (4.6)):

$$L_{VK} = \frac{1}{2} \cdot (y_{VK,i+1}^* - y_{VK,i}^*) \cdot (q_{VK,i+1} + q_{VK,i}) \quad (4.44)$$

- b) Poloha výslednice (Obr. 4.5):

- i) Souřadnice y_L – v těžišti zátěžného obrazce $q(y)$ (tj. těžiště lichoběžníku, rovnice (4.7)):

$$y_{L,VK}^* = \frac{y_{VK,i+1}^* - y_{VK,i}^*}{3} \cdot \frac{q_{VK,i} + 2 \cdot q_{VK,i+1}}{q_{VK,i} + q_{VK,i+1}} \quad (4.45)$$

- ii) Souřadnice r_L – lineární interpolací vzdáleností HN a OR ve vybraných řezech (tj. vzdálenost r) pro souřadnici y_L

$$r_{L,VK} = r_{q,VK}(y_{L,VK}) = r_{q,VK,i} - \frac{r_{q,VK,i} - r_{q,VK,i+1}}{y_{VK,i+1}^* - y_{VK,i}^*} \cdot (y_{L,VK} - y_{VK,i}^*) \quad (4.46)$$

- iii) Vzdálenost r (OH a OR) v místě souřadnice $y_{L,i}$:

$$r_{VK}(y_{L,VK}) = r_{VK,i} - \frac{r_{VK,i} - r_{VK,i+1}}{y_{VK,i+1}^* - y_{VK,i}^*} \cdot (y_{L,VK} - y_{VK,i}^*) \quad (4.47)$$

6) Závěsový moment.

- a) Rameno:

$$h_{L,VK} = r_{L,VK} - r_{VK}(y_{L,K}) \quad (4.48)$$

- b) Závěsový moment:

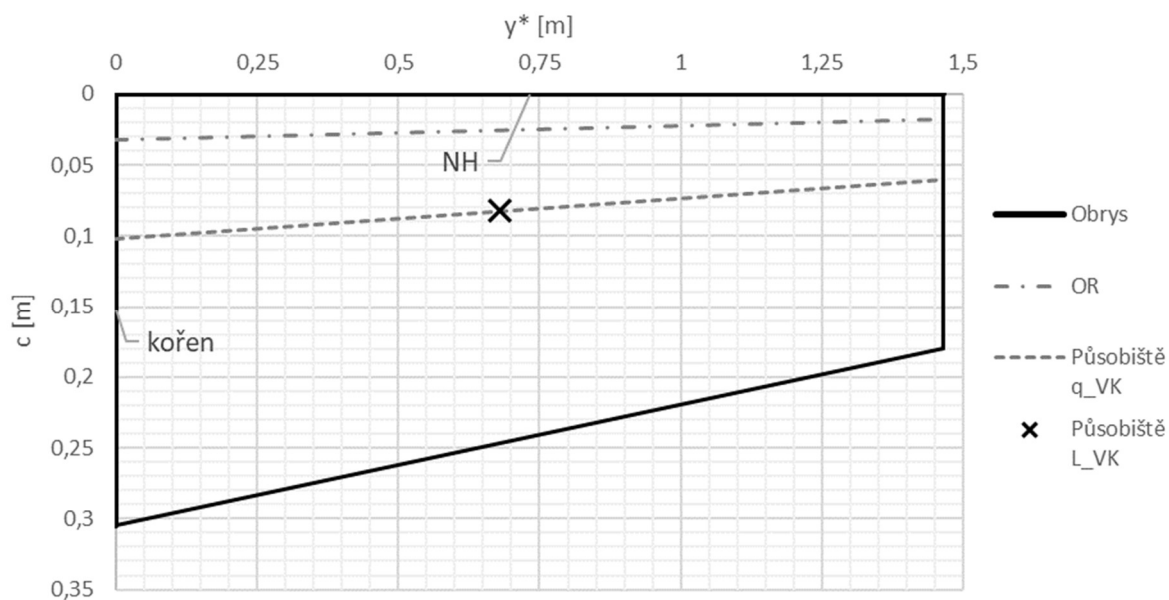
$$H_{VK} = L_{VK} \cdot h_{L,VK} \quad (4.49)$$

4.6.3 Výsledky

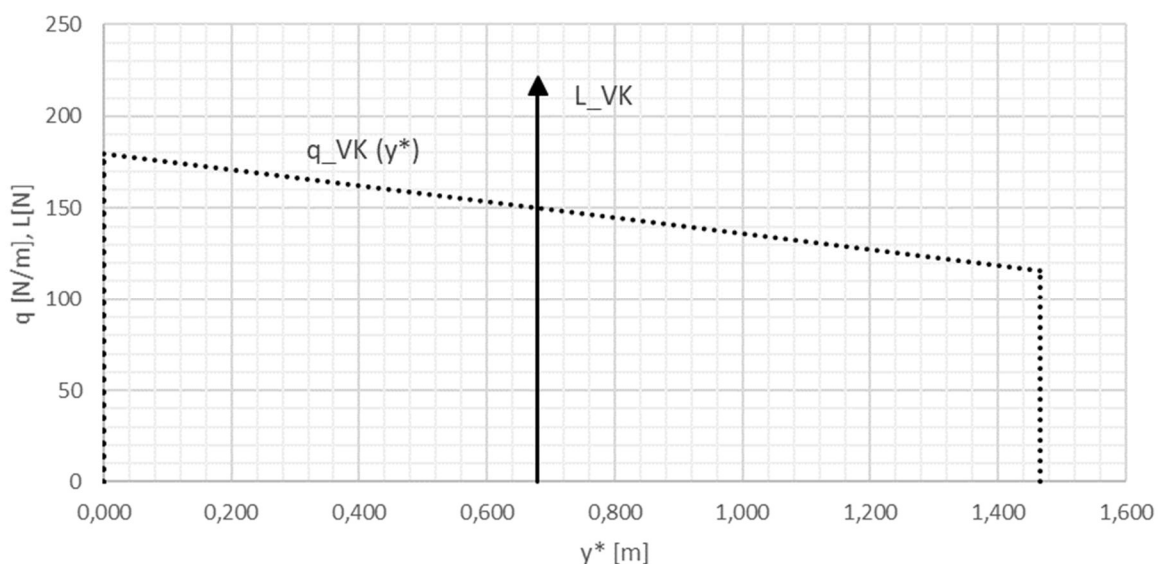
Vypočtené hodnoty jsou shrnuty na Obr. 4.17 a Obr. 4.18. Tabulky se všemi hodnotami jsou uvedeny v příloze (Příloha D).

Závěsový moment působící na výškové kormidlo je:

- Trojúhelníkové rozložení: $H_{VK} = 12,3 \text{ N} \cdot \text{m}$
- Parabolické rozložení – je dán průběh po délce tělvy: $H_{VK} = 14,9 \text{ N} \cdot \text{m}$



Obr. 4.17: Geometrie výškového kormidla (parabolické rozložení)



Obr. 4.18: Zatížení výškového kormidla (počátek s.s. odpovídá kořeni, parabolické rozložení)

4.7 Zatížení vyvažovacích plošek VK

4.7.1 Popis vyvažovací plošky křidélek

Vyvažovací plošky výškového kormidla jsou umístěny v kořeni kormidel dle Obr. 4.15. Základní parametry jsou uvedeny v Tab. 4.6.

Tab. 4.6: Základní parametry jedné vyvažovací plošky výškového kormidla

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Rozpětí	$b_{VP,VK}$	700	[mm]
Plocha	$b_{VP,VK}$	0,053	[m ²]
Výchylka	$\delta_{VP,VK}$	17,5 / -22,5	[°]

4.7.2 Postup výpočtu

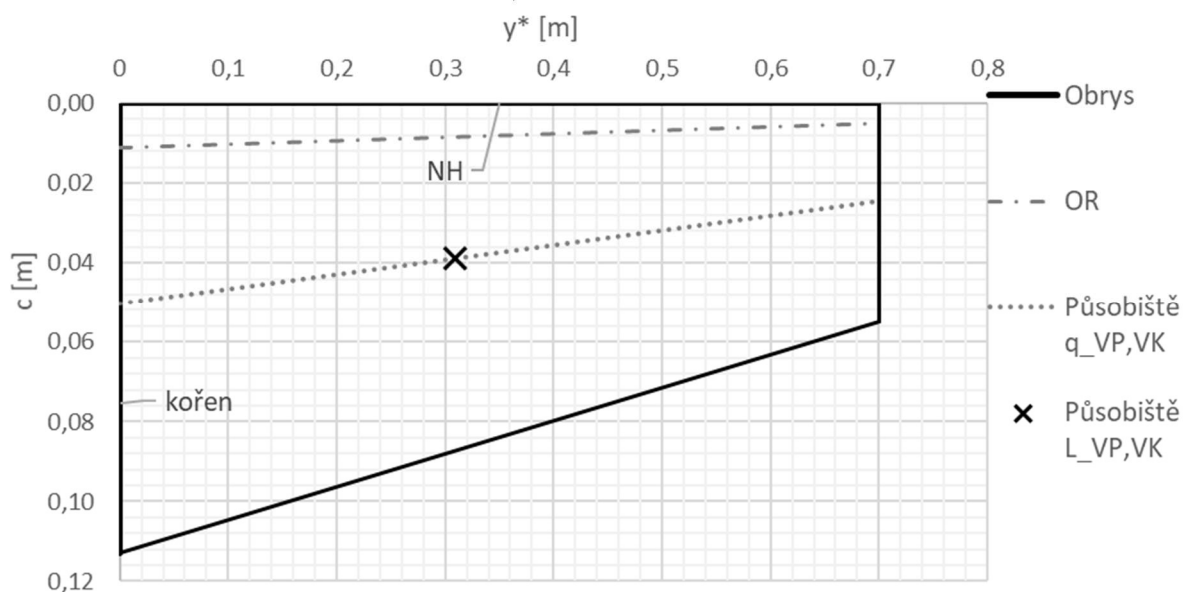
Postup výpočtu je shodný s postupem uvedeným u vyvažovacích plošek křidélek (kapitola 4.5.2).

4.7.3 Výsledky

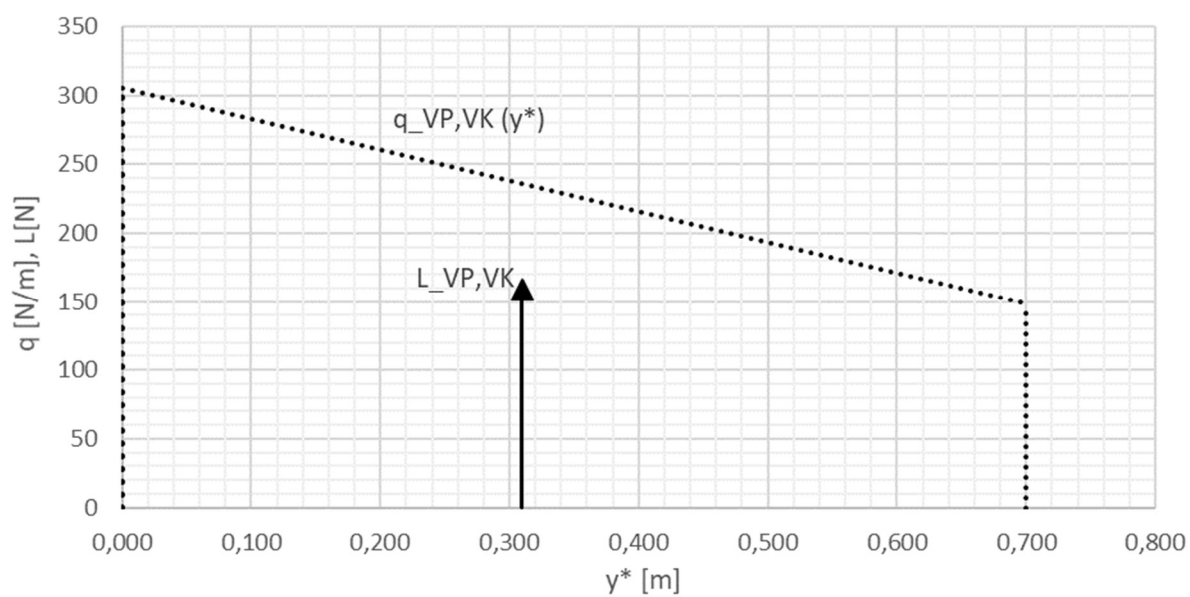
Vypočtené hodnoty jsou shrnuty na Obr. 4.19 a Obr. 4.20. Tabulky se všemi hodnotami jsou uvedeny v příloze (Příloha D).

Závěsový moment působící na jednu vyvažovací plošku výškového kormidla je:

$$H_{VP,VK} = 4,8 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Obr. 4.19: Geometrie vyvažovací plošky VK

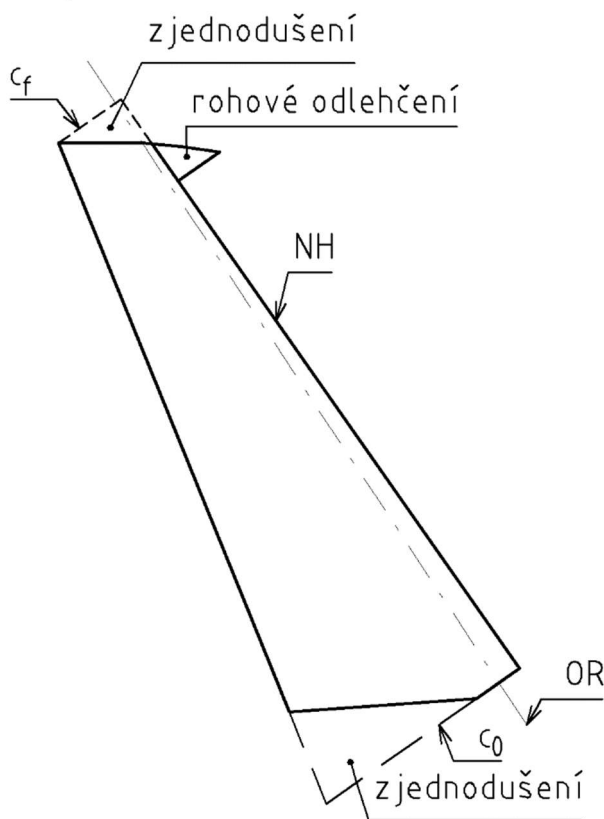


Obr. 4.20: Zatížení vyvažovací plošky VK (počátek s.s. odpovídá kořeni)

4.8 Zatížení směrového kormidla

4.8.1 Popis směrového kormidla

Náběžná hrana směrového kormidla je skloněna o 35° vůči horizontále. Půdorys je mnohoúhelníkový a na konci SK se nachází plocha rohového odlehčení. Pro zjednodušení výpočtu doplníme půdorys na lichoběžník a rohové odlehčení zanedbáme (větší plocha povede k většímu závěsovému momentu a tím pádem k naddimenzování trasy řízení). Vyvažování je zajištěno plechem na odtokové hraně. Popis směrovky je na Obr. 4.21 a v Tab. 4.7. Pro výpočet zatížení uvažujeme, že vzduch nabíhá na kormidlo kolmo na jeho náběžnou hranu.



Tab. 4.7: Základní parametry SK

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Rozpětí	b_{SK}	1346	[mm]
Poměrná hloubka	\bar{c}_{SK}	35	[%]
Plocha	b_{SK}	0,32	[m ²]
Výchylka	δ_{SK}	± 30	[°]

Obr. 4.21: Náčrt směrového kormidla

4.8.2 Postup výpočtu

Postup výpočtu je téměř shodný s postupem uvedeným u výškového kormidla (kapitola 4.6.2). Výjimkou je výpočet průměrného tlakového zatížení⁶ dle vztahů:

a) pro $n_1 \cdot \frac{W}{S} < 47 \text{ lb}/ft^2$:

$$\bar{w}_{SK} = 3,66 \cdot \sqrt{n_1 \cdot \frac{W}{S}} \quad (4.50)$$

b) pro $n_1 \cdot \frac{W}{S} > 47 \text{ lb}/ft^2$:

$$\bar{w}_{SK} = 0,534 \cdot n_1 \cdot \frac{W}{S} \quad (4.51)$$

⁶ CS-23, Dodatek A, Obrázek A5, čára (1)

Pro TL Trainer platí:

$$n_1 \cdot \frac{W}{S} \doteq 72 \text{ lb/ft}^2$$

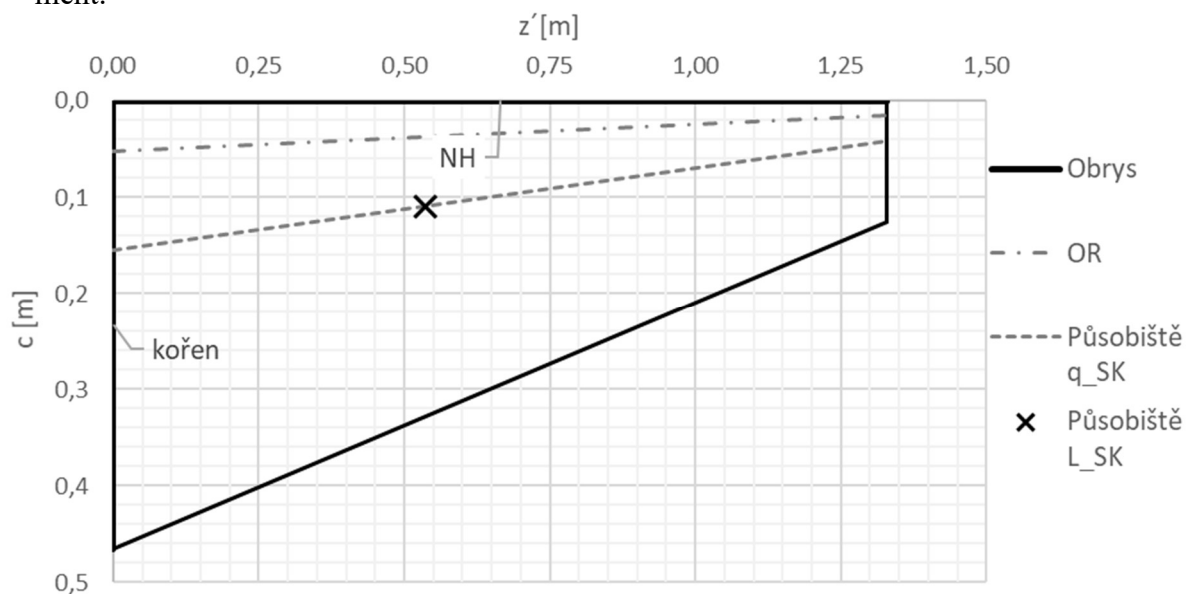
4.8.3 Výsledky

Vypočtené hodnoty jsou shrnuty na Obr. 4.22 a Obr. 4.23. Tabulky se všemi hodnotami jsou uvedeny v příloze (Příloha D).

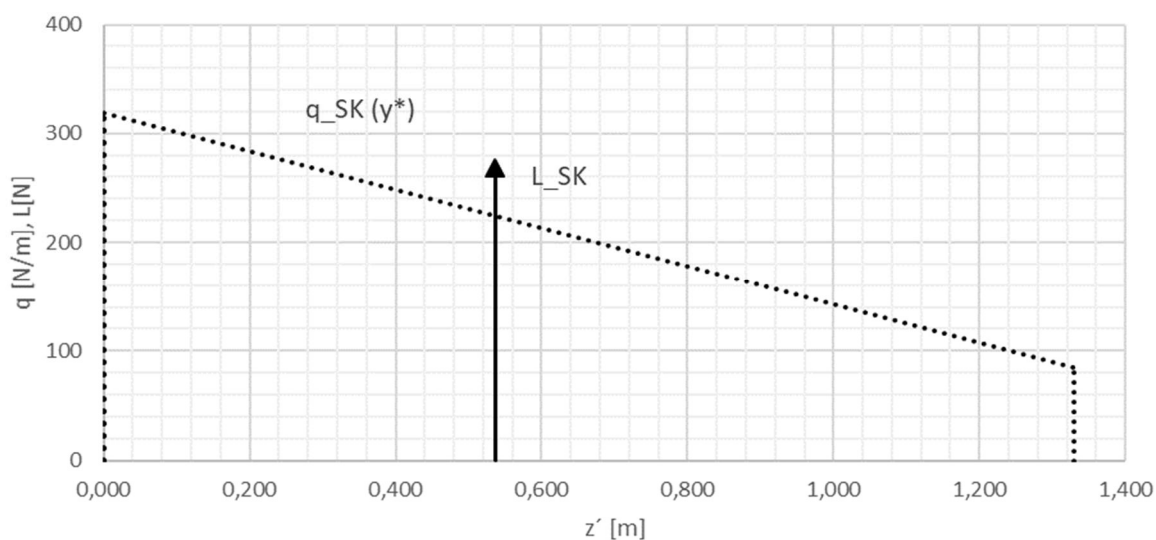
Závěsový moment působící na směrové kormidlo je:

- c) trojúhelníkové rozložení: $H_{SK} = 19,4 \text{ N} \cdot \text{m}$,
- d) parabolické rozložení: $H_{SK} = 13,3 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Grafy na platí pro trojúhelníkové rozložení zatížení, které způsobuje větší závěsový moment.



Obr. 4.22: Vypočtená geometrie SK

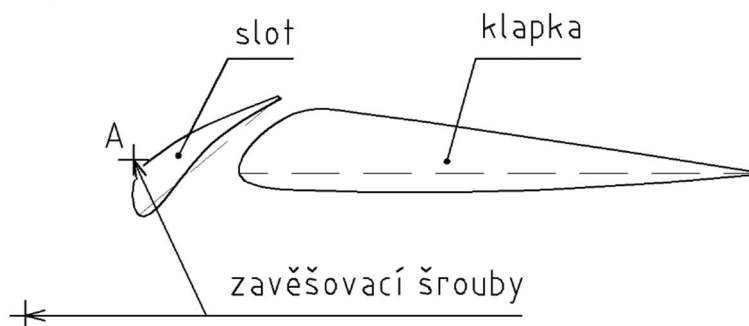


Obr. 4.23: Rozložení zatížení na SK

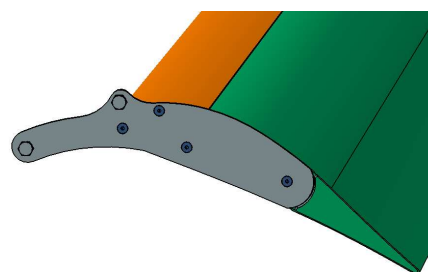
4.9 Zatížení vztlakových klapek

4.9.1 Popis vztlakových klapek

Vztlakové klapky jsou dvou-šterbinové s tzv. pevným slotem. Profil je znázorněn na Obr. 4.24. Tětiva slotu je skloněna o 40° vůči horizontále. Klapka a slot jsou spojeny plechem (viz Obr. 4.25).



Obr. 4.24: Náčrt profilu vztlakové klapky

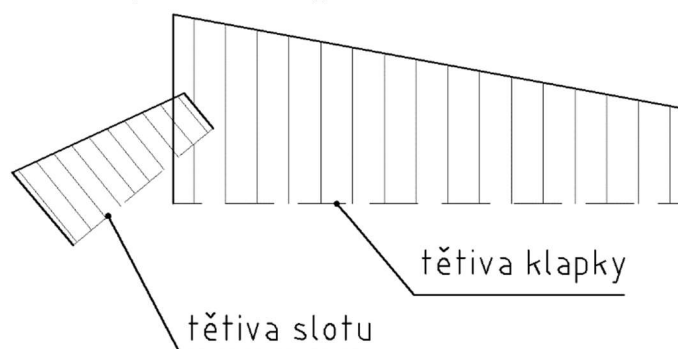


Obr. 4.25: Spojení klapky a slotu v kořenové části (zelená – klapka, oranžová – slot)

Tab. 4.8: Základní parametry klapky

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Rozpětí	b_{kl}	1975	[mm]
Poměrná hloubka	\bar{c}_{kl}	25	[%]
Plocha	b_{kl}	0,60	[m ²]
Výchylka	δ_{kl}	+ 10 / + 21,5 / + 32	[°]

Při výpočtu zatížení je uvažováno rozložení tlaku nad tětivou dle Obr. 4.26, tzn. každá část je uvažována zvlášť. Klapka je zavěšena na dvou šroubech, které se pohybují v kulise, po kruhových drahách. Na těchto šroubech se vykompenzuje závěsový moment klapky. Přenos zatížení klapky do systému řízení je realizován pomocí ozubeného hřebenu, který je připojen ke šroubu A (viz Obr. 4.24) a přenáší pouze osovou sílu. Z toho důvodu není vhodné pro klapky určovat závěsový moment ale jen sílu, která působí v ose ozubeného hřebenu.



Obr. 4.26: Rozložení zatížení na klapce

4.9.2 Postup výpočtu

Kroky 1) až 5) provedeme zvlášť pro slot i klapku.

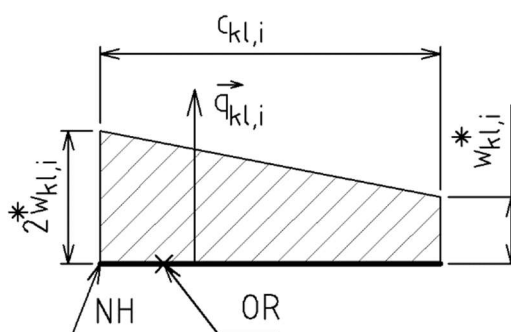
1) Volba řezů:

- kořen ($i = 0$),
- konec ($i = f$).

2) Průměrné tlakové zatížení⁷:

$$\bar{w}_{kl} = 0,64 \cdot n_1 \cdot \frac{W}{S} \quad (4.52)$$

3) Přerozdělení \bar{w}_{kl} po délce tětiny na modelové tlakové rozdělení⁸ $w_{VP,kl} = f(c)$ (Obr. 4.12). Toto provedeme pouze ve vybraných řezech.



Obr. 4.27: Modelové rozložení tlaku v řezu vyvažovací plošky křídélka (bez uvážení OP)

Přerozdělení provedeme v souladu s rovnicí (4.2) a Obr. 4.2 a Obr. 4.12 (těžiště pravoúhlého lichoběžníku):

$$\bar{w}_{kl} \cdot c_{kl,i} = \frac{3}{2} \cdot w_{kl,i}^* \cdot c_{kl,i} \quad (4.53)$$

Vyjádříme maximální zatížení $w_{VP,kl,i}^*$ (po zjednodušení):

$$w_{kl,i}^* = \frac{2}{3} \cdot \bar{w}_{kl} \quad (4.54)$$

4) Velikosti výslednice q pro zvolené řezy (Obr. 4.3), rovnice (4.4).

$$q_{kl,i} = \bar{w}_{kl} \cdot c_{kl,i} \quad (4.55)$$

5) Velikost silové výslednice L – numerickou integrací plochy pod křivkou liniového zatížení $q(y)$ (Obr. 4.4, rovnice (4.6)):

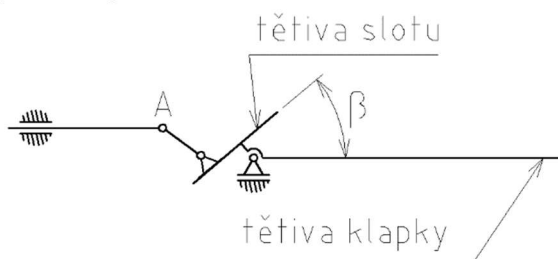
$$L_{kl} = \frac{1}{2} \cdot (y'_{kl,i+1} - y'_{kl,i}) \cdot (q_{kl,i+1} + q_{kl,i}) \quad (4.56)$$

⁷ CS-23, Dodatek A, Obrázek A6, čára (4)

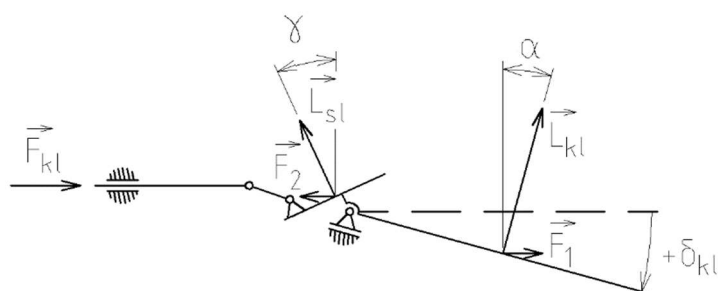
⁸ CS-23, Dodatek A, Tabulka 2, VZTLAKOVÁ KLAPKA IV

6) Síla do ozubeného hřebenu

Postupujeme s využitím Obr. 4.28 a Obr. 4.29 a rovnic v Tab. 4.9.



Obr. 4.28: Kinematické schéma vysouvání klapky



Obr. 4.29: Výpočet síly působící na ozubený hřeben klapky

Tab. 4.9: Výpočet geometrie členu ② křídélka

Člen ②	
$a = \delta_{kl}$	(4.57)
$\beta = 40^\circ$	(4.58)
$\gamma = \beta - \alpha$	(4.59)
$F_1 = L_{kl} \cdot \cos \alpha$	(4.60)
$F_2 = L_{sl} \cdot \cos \gamma$	(4.61)
$F_{kl} = L_1 - L_2$	(4.62)

4.9.3 Výsledky

Vypočtené hodnoty jsou shrnuty v Tab. 4.10. Tabulky se všemi hodnotami jsou uvedeny v příloze (Příloha D).

Síla působící na ozubený hřeben je:

$$F_3 = 493 \text{ N.}$$

Tab. 4.10: Výsledné síly působící na vztakovou klapku

L_{kl}	F_1	L_{sl}	F_2	F_{kl}
[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
1024	543	360	50	493

4.10 Shrnutí výsledků

Výsledky zatížení řídicích ploch jsou shrnuty v Tab. 4.11. Tyto momenty a síly vstupují do trasy řízení a vyvolávají reakční síly od pilota na řídidlech. Pro pevnostní kontrolu však musí být, dle požadavků předpisu, tyto síly zvětšeny, jak je uvedeno dále. Tímto je splněn požadavek předpisu na určení tlakových zatížení konstrukce.

Tab. 4.11: Závěsové momenty jednotlivých kormidel

Řídicí plocha [-]	Max. závěsový moment [Nm]	Max. síla do řízení [N]
Křídélka	14,8	
VP křidélek	1,7	
Výškové kormidlo	14,9	
VP výškového kormidla	4,8	
Směrové kormidlo	19,4	
Vztlaková klapka		493

5 ZATÍŽENÍ SYSTÉMU ŘÍZENÍ

5.1 Úvod

Pro správné vyhodnocení zatížení trasy řízení je třeba provést silový rozbor při maximálním závěsovém momentu (v případě klapky při max. síle) a zároveň při nulové výchylce kormidla a při max. kladné i záporné výchylce. Výpočet začíná na kormidle (zde je známo zatížení a výchylka) a postupuje se směrem k řídídlu. Nejprve je určena geometrie všech tří případů zatížení a následně se určí zatížení na jednotlivých členech mechanismu (také pro všechny případy výchylek). Předpokládáme, že kladná výchylka způsobí kladný závěsový moment a naopak. Pro nulovou výchylku uvažujeme rovněž kladný závěsový moment.

Jednotlivé trasy řízení jsou řešeny jako rovinné mechanismy.

Cílem této kapitoly je přepočíst závěsové momenty přes kinematiku řízení až na síly na řídidlech, které se následně porovnají s omezeními danými předpisem. Předpis CS-23 Amdt.5 opět formuluje pouze obecné požadavky, proto je k porovnání řídicích sil využito starší znění předpisu Amdt. 3.

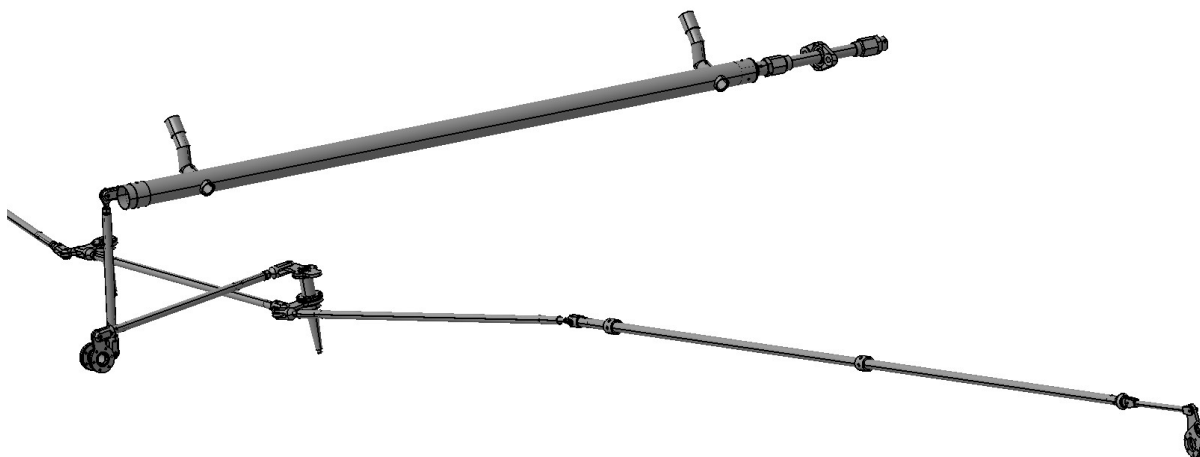
Některé zásady použité v této kapitole:

- Značení (symboly neodpovídají symbolům v ostatních kapitolách této práce, pro přehlednost není použito indexování příslušných řídicích ploch):
 - délkové rozměry – malá latinská písmena,
 - úhlové rozměry – malá řecká písmena,
 - kinematické vazby, zatížení – velká latinská písmena.
- Dolní indexy:
 - $_0$ – velikost při nulové výchylce kormidla.
- Čáry:
 - silná plná – konfigurace členu při nulové výchylce kormidla,
 - silná čárkovaná – konfigurace členu při maximální kladné výchylce kormidla,
 - tenká plná, tenká čárkovaná – ostatní.
- Přesnost odečítání z 3D modelu (dále uvedená přesnost odečítání rozměrů se ukázala v průběhu výpočtu jako dostatečná)
 - délkové rozměry – desetiny milimetrů,
 - úhlové rozměry – desetiny stupňů.
- Konfigurace a zatížení – každé kinematické schéma zobrazuje:
 - polohu členů při nulové a maximální kladné výchylce kormidla,
 - závěsový moment pro maximální kladnou výchylku kormidla.

5.2 Zatížení trasy řízení křidélek

5.2.1 Popis trasy řízení křidélek

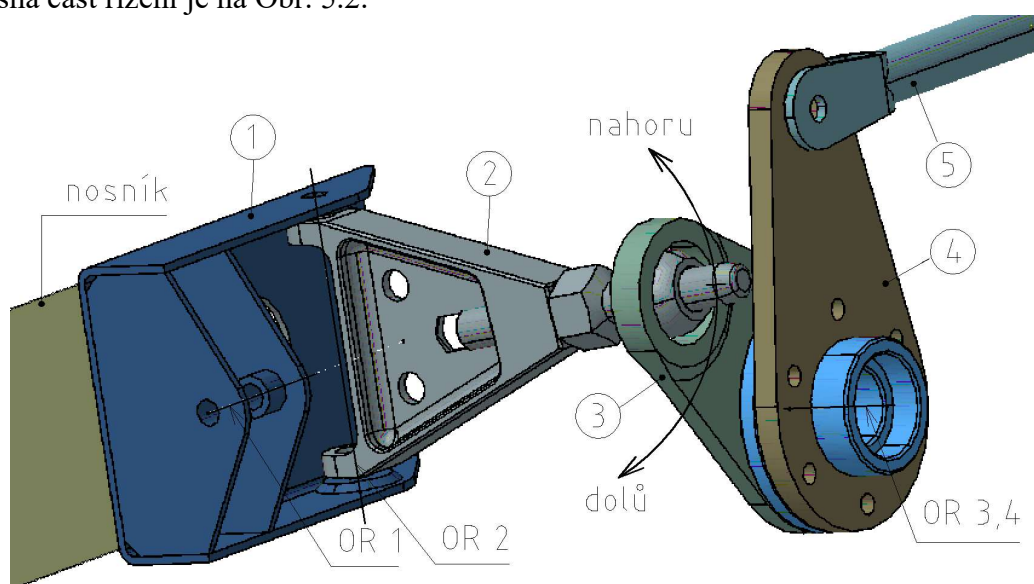
Řízení křidélek se uskutečňuje pomocí boční řídicí páky, která je umístěn na pravé straně v kabině pilotů. Křidélka se ovládají rotací řídicí páky vpravo/vlevo. Mechanismus obsahuje páky a trubková táhla. Výchylka kormidel je diferencovaná, tzn. výchylka nahoru je větší než dolů. Celá trasa řízení je zobrazena na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Trasa řízení křidélek (pohled zprava, zezadu)

5.2.2 Uzel 1

Príslušná část řízení je na Obr. 5.2.

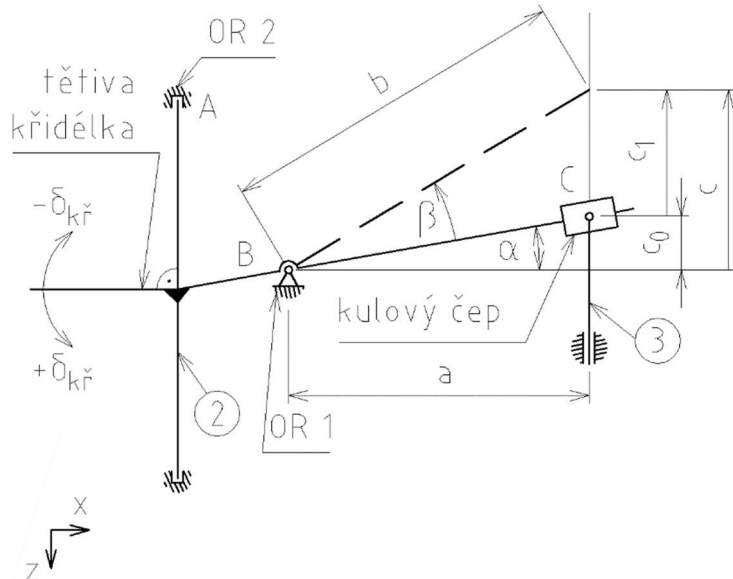


Obr. 5.2: Trasa řízení křidélka – uzel 1 (pohled zleva, zepředu)

Svarek ① je pevně spojen s nosníkem křidélka, osa rotace (OR1) je rovnoběžná s osou y letounu (vzepětí je zanedbáno). Výchylka δ_{kf} se přenáší na páku ②, osa rotace mezi členy ① a ② slouží ke kompenzaci pohybu členu ② ve vodorovné rovině, v následujícím výpočtu je však tento pohyb pro zjednodušení zanedbán. Mezi členy ② a ③ je umístěn posuvný kulový čep, který umožňuje volnost vzájemného pohybu. Výchylka členu ② nahoru/dolů způsobí rotaci pák ③ a ④ (jsou pevně spojeny). Páka ④ potom způsobuje pohyb táhla ⑤.

1) Geometrie členu ② dle Obr. 5.3.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: b_0 , α .
- Využijeme rovnic v Tab. 5.1.



Tab. 5.1: Výpočet geometrie členu ② křídélka

Člen ②	
$\beta = \delta_{kř}$	(5.1)
$a = b_0 \cdot \cos \alpha$	(5.2)
$b = \frac{a}{\cos(\alpha + \beta)}$	(5.3)
$c = b \cdot \sin(\alpha + \beta)$	(5.4)
$c_1 = c - c_0$	(5.5)

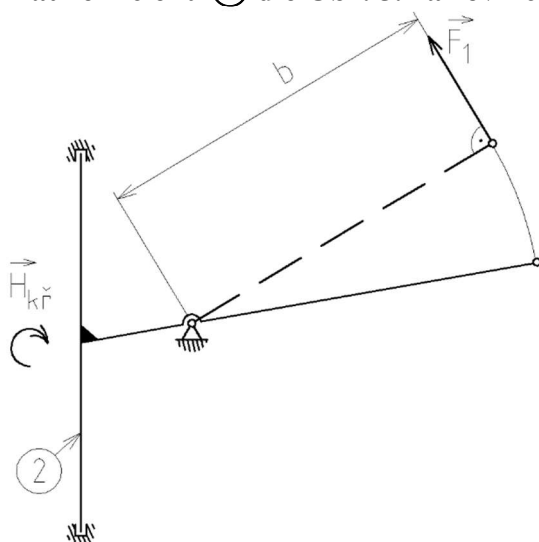
Obr. 5.3: Člen ②, křídélko, geometrie

Na tomto místě je třeba dbát na to, aby s dostatečnou přesností platilo:

$$b(\delta_{kř} = 12^\circ) = b(\delta_{kř} = -25^\circ)$$

čímž je zajištěna správná diferenciací výchylky křídélka. Člen ② tvoří spolu s tětivou křídélka, zalomenou páku, která diferenciaci zajišťuje. Chyba může vzniknout při nepřesném odečítání rozměrů z CAD modelu.

2) Zatížení členu ② dle Obr. 5.4 a rovnice v Tab. 5.2.



Tab. 5.2: Výpočet zatížení členu ② křídélka

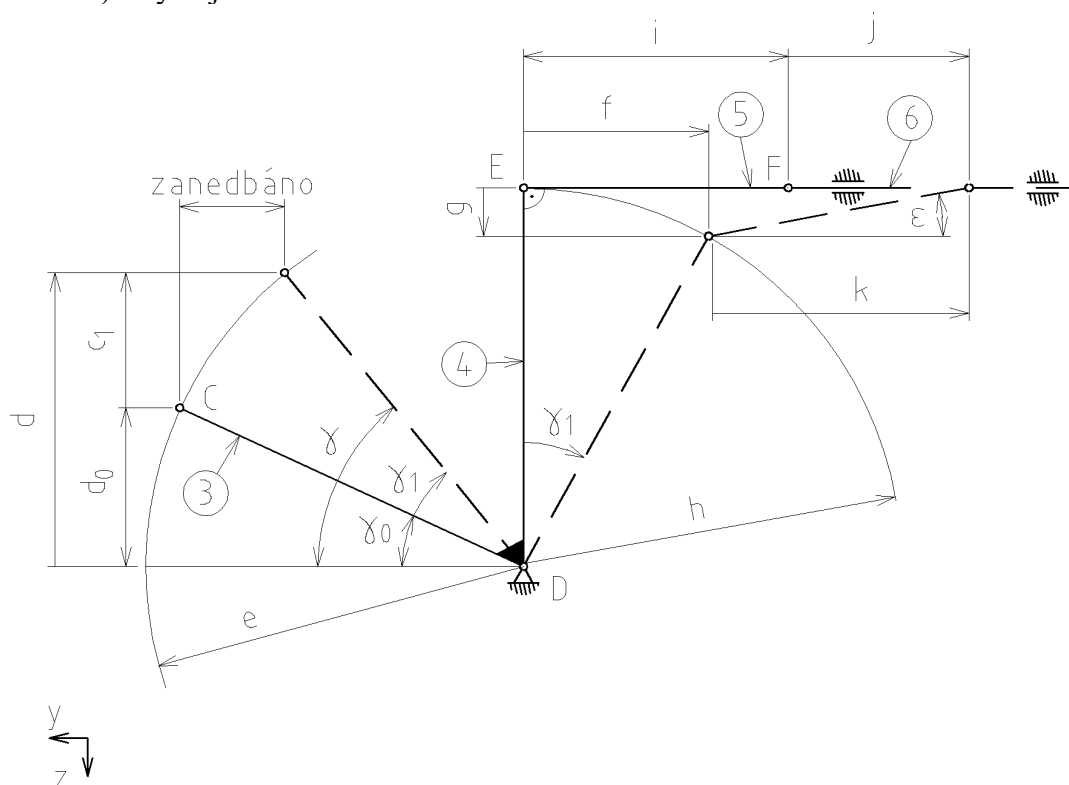
Člen ②	
$F_1 = \frac{H_{kř}}{b}$	(5.6)

Kulový čep zajišťuje, že síla F_1 je vždy kolmá k ramenu b .

Obr. 5.4: Člen ②, křídélko, zatížení

3) Geometrie členů ③, ④ a ⑤ dle Obr. 5.5.

- a) Z CAD modelu odečteme hodnoty: e , γ_0 , h , i .
b) Využijeme rovnic v Tab. 5.3.

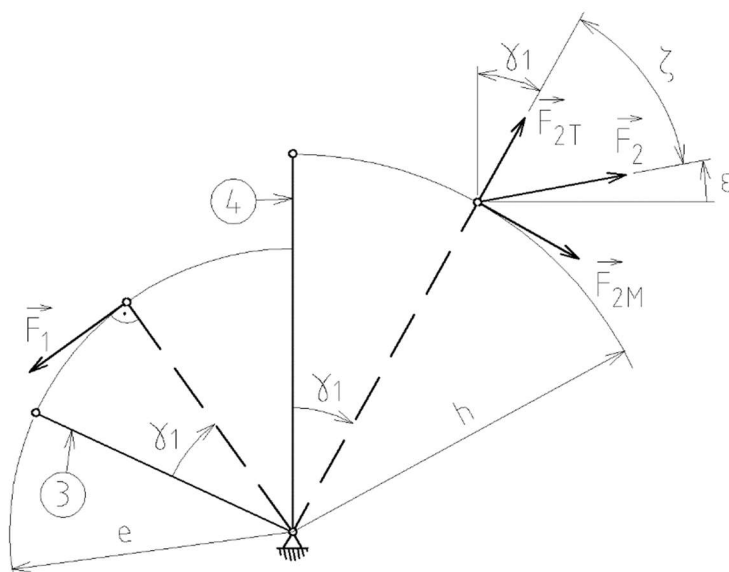


Obr. 5.5: Členy ③, ④, ⑤, křídélko, geometrie

Tab. 5.3: Výpočet geometrie členů ③, ④ a ⑤ křídélka

Člen ③:	Členy ④, ⑤:
$d_0 = e \cdot \sin \gamma_0$ (5.7)	$f = h \cdot \sin \gamma_1$ (5.8)
$d = d_0 + c_1$ (5.9)	$g = h \cdot (1 - \cos \gamma_1)$ (5.10)
$\gamma = \sin^{-1} \frac{d}{e}$ (5.11)	$\varepsilon = \sin^{-1} \frac{g}{i}$ (5.12)
$\gamma_1 = \gamma - \gamma_0$ (5.13)	$k = i \cdot \cos \varepsilon$ (5.14)
Zde je vhodné, znovu zkontrolovat, že platí: $\gamma_1(\delta_{kř} = 12^\circ) = \gamma_1(\delta_{kř} = -25^\circ)$; $\gamma_1(\delta_{kř} = 0^\circ) = 0^\circ$ čímž je zajištěna správná diferenciací vý- chylky křídélka. Pohyby dalších členů ④, ⑤, ... jsou stejně velké pro obě max. vý- chylky křídélka.	Pro $\gamma_1 > 0$: $j = f + k - i$ (5.15) Pro $\gamma_1 < 0$: $j = f - k + i$ (5.16)

4) Zatížení členů ③, ④ a ⑤ dle Obr. 5.6 a rovnic v Tab. 5.4.



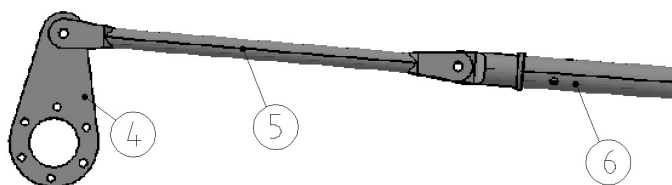
Obr. 5.6: Členy ③, ④ a ⑤, křídélko, zatížení

Tab. 5.4: Výpočet zatížení členů ③, ④ a ⑤ křídélka

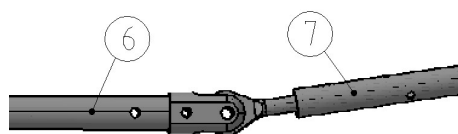
Člen ③:	Člen ④:
Síla F_1 dle rovnice (5.6). Kulový čep zajišťuje, že síla F_1 je vždy kolmá k rameni e .	$F_{2M} = \frac{F_1 \cdot e}{h}$ (5.17)
	pro $\gamma_1 > 0$: (5.18)
	$\zeta = 90^\circ - \gamma_1 - \varepsilon$
	pro $\gamma_1 < 0$: (5.19)
	$\zeta = 90^\circ - \varepsilon$
	$F_2 = \frac{F_{2M}}{\sin \zeta}$ (5.20)
Člen ⑤:	$F_{2T} = \frac{F_{2M}}{\tan \zeta}$ (5.21)
	$\vec{F}_2 = \vec{F}_{2M} + \vec{F}_{2T}$ (5.22)
Člen ⑤: Člen ⑤ je zatížen pouze silou F_2 , která leží v jeho ose.	

5.2.3 Uzel 2

Táhlo ⑥ je uloženo ve dvou lineárních ložiscích a kloubovými vazbami připevněno k táhlům ⑤ a ⑦. Přičemž táhlo ⑤ se pohybuje v rovině yz (Obr. 5.7) a táhlo ⑦ se pohybuje v rovině xy (Obr. 5.8).



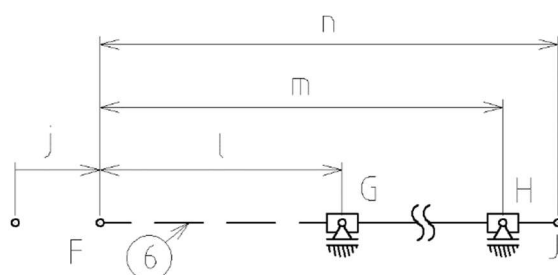
Obr. 5.7: Trasa řízení křídélka – uzel 2, část 1 (pohled v rovině yz)



Obr. 5.8: Trasa řízení křídélka – uzel 2, část 2 (pohled v rovině xy)

5) Geometrie členu ⑥ dle Obr. 5.9.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: l_0 , m_0 , n ,
- Využijeme rovnic v Tab. 5.5.



Obr. 5.9: Člen ⑥, křídélko, geometrie

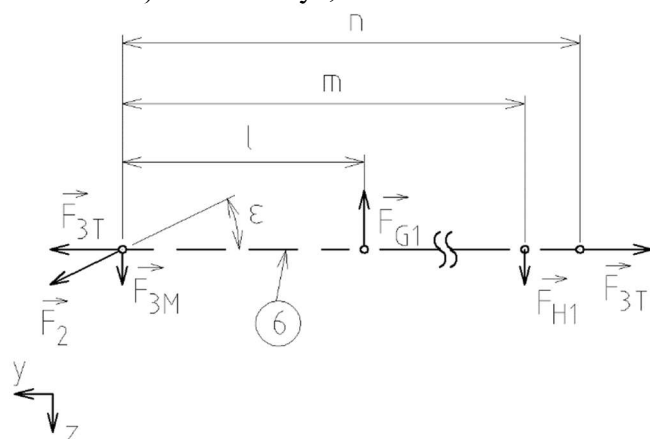
Tab. 5.5: Výpočet zatížení členu ⑥ křídélka

Člen ⑥	
$l = l_0 + j$	(5.23)
$m = m_0 + j$	(5.24)

Vazby H, I představují lineární ložiska

6) Zatížení členu ⑥.

- V rovině yz, dle Obr. 5.10 a rovnic v Tab. 5.6.

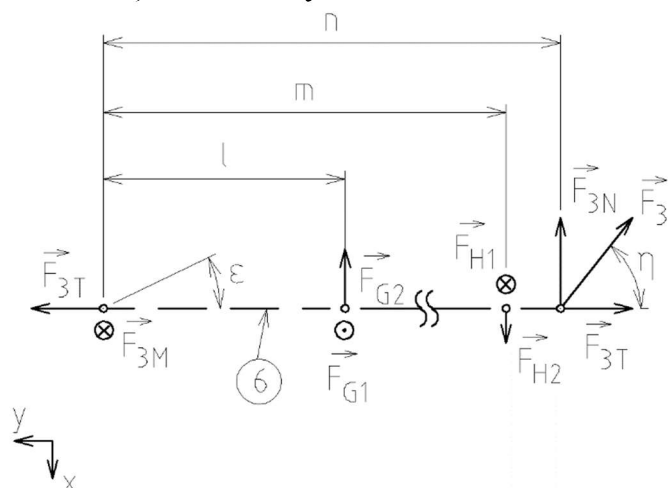


Obr. 5.10: Člen ⑥, křídélko, zatížení v rovině yz

Tab. 5.6: Výpočet zatížení členu ⑥ křídélka v rovině yz

Člen ⑥	
$F_{3T} = F_2 \cdot \cos \varepsilon$	(5.25)
$F_{3M} = F_2 \cdot \sin \varepsilon$	(5.26)
$F_{H1} = \frac{F_{3M} \cdot l}{m - l}$	(5.27)
$F_{G1} = \frac{F_{3M} \cdot m}{m - l}$	(5.28)

b) V rovině xy, dle Obr. 5.11 a rovnic v Tab. 5.7:



Obr. 5.11: Člen ⑥, křídélko, zatížení v rovině xy

Tab. 5.7: Výpočet zatížení členu ⑥ křídélka v rovině xy

Člen ⑥	
$F_3 = \frac{F_{3T}}{\cos \eta}$	(5.29)
$F_{3N} = F_{3T} \cdot \tan \eta$	
Úhel η je určen v kroku 0.	(5.30)
$F_{H2} = \frac{F_{3N} \cdot (n - l)}{m - l}$	(5.31)
$F_{G2} = \frac{F_{3N} \cdot (n - m)}{m - l}$	(5.32)

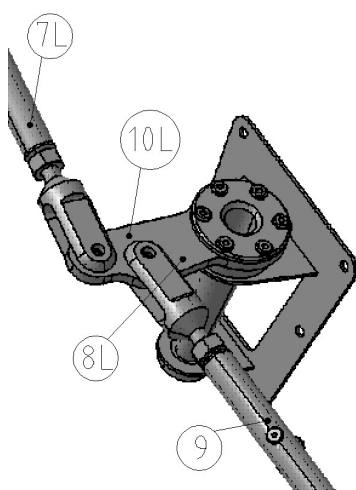
c) Celkové zatížení ložisek G a H dle rovnic (5.33) a (5.34) .

$$F_H = \sqrt{F_{H1}^2 + F_{H2}^2} \quad (5.33)$$

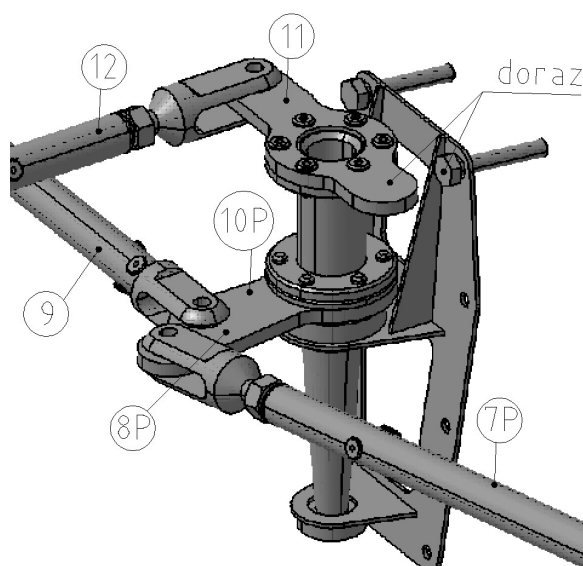
$$F_G = \sqrt{F_{G1}^2 + F_{G2}^2} \quad (5.34)$$

5.2.4 Uzel 3

Všechny výše zmíněné části řízení křidélek jsou stejné pro pravou i levou stranu letounu. Uzel 3 se ale pro obě strany liší. Na Obr. 5.12 a Obr. 5.13 jsou odpovídající si části trasy řízení pro levou a pravou stranu letounu. Táhlo ⑦ vede ke křídélku a táhlo ⑨ spojuje obě strany. Uzel 3 na pravé straně je doplněn o páku ⑪, která pokračuje dál k řídicí páce.



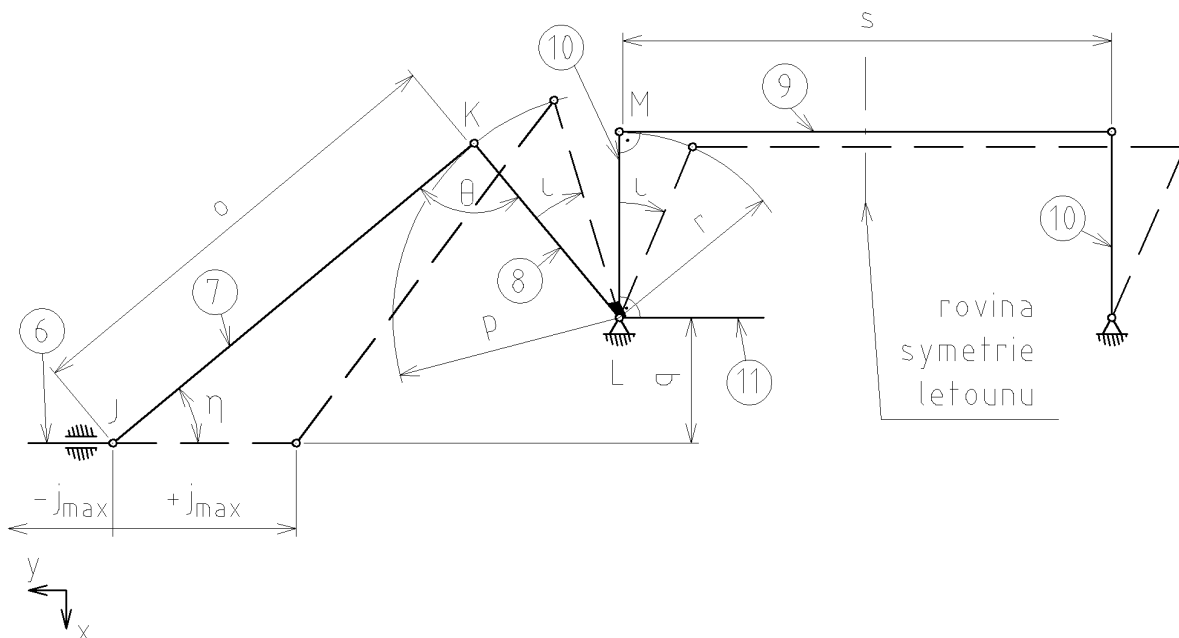
Obr. 5.12: Trasa řízení křídélka – uzel 3, levá strana (pohled zezadu, zprava)



Obr. 5.13: Trasa řízení křídélka – uzel 3, pravá strana (pohled zezadu, zprava)

7) Geometrie členů ⑦ až ⑩ dle Obr. 5.14.

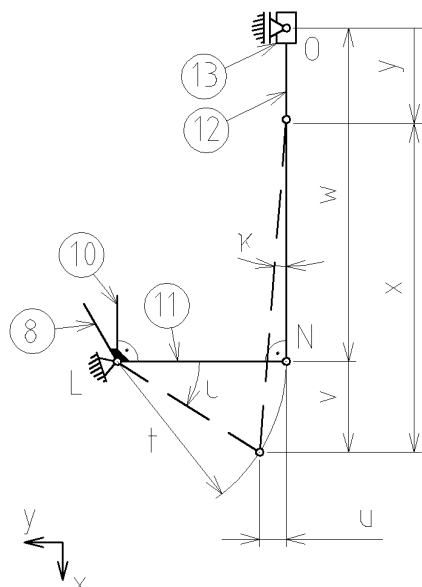
- Z CAD modelu odečteme hodnoty: o , p , r , s .
- V tomto případě nelze jednoduše vypočíst polohu jednotlivých členů po vychýlení kormidla (známá je hodnota j_{\max}). Proto se potřebné geometrické veličiny určí graficky. Veličiny určené graficky pro všechny tři uvažované vychylky křídélka: η , θ , ι .



Obr. 5.14: Členy ⑦ až ⑩ křídélko, geometrie

8) Geometrie členů ⑪ a ⑫ dle Obr. 5.15.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: t , w .
- Využijeme rovnic v Tab. 5.8.

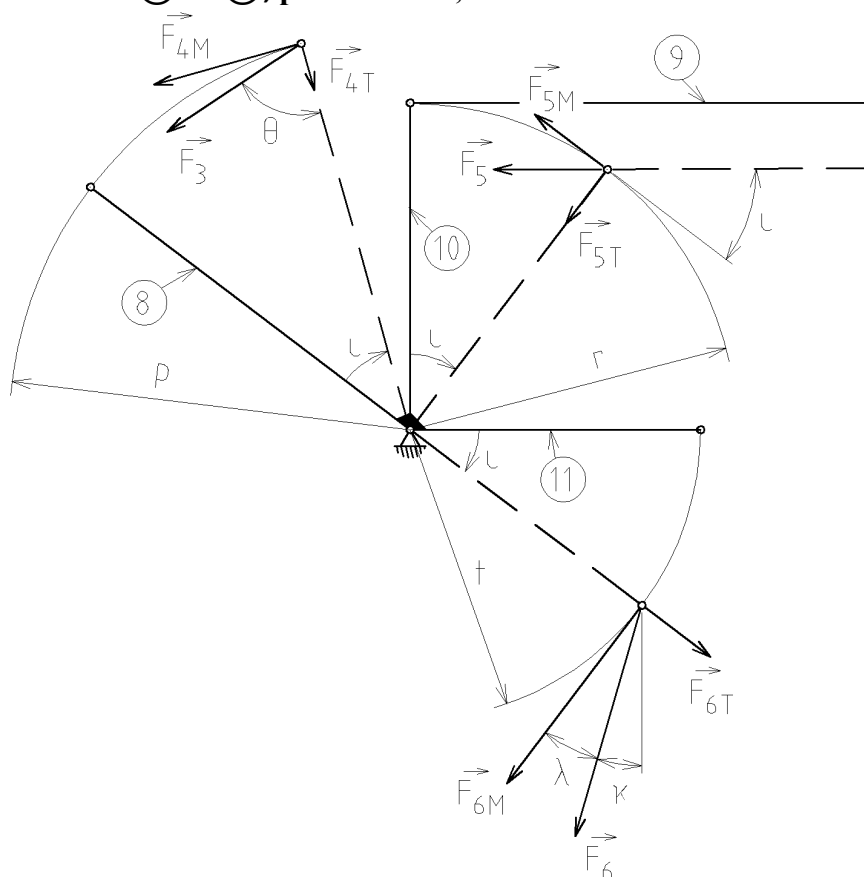


Obr. 5.15: Členy ⑪ a ⑫, křídélko, geometrie

Tab. 5.8: Výpočet geometrie členů ⑪ a ⑫ křídélka

Členy ⑪ a ⑫	
$u = t \cdot (1 - \cos \iota)$	(5.35)
$v = t \cdot \sin \iota$	(5.36)
$\kappa = \sin^{-1} \frac{u}{w}$	(5.37)
$x = w \cdot \cos \kappa$	(5.38)
Pro $\iota \geq 0$:	(5.39)
$y = v + w - x$	
Pro $\iota < 0$:	(5.40)
$y = v + x - w$	

9) Zatížení členů ⑧ až ⑫, pravá strana, dle Obr. 5.16 a rovnic v Tab. 5.9.



Obr. 5.16: Členy ⑧ až ⑫, křídélko, pravá strana, zatížení

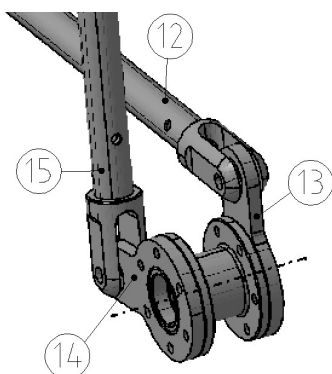
Tab. 5.9: Výpočet zatížení členů ⑧ až ⑫ křídélka

Člen ⑧:	Člen ⑨:
<p>Pro $\iota \geq 0$:</p> $F_{4M} = F_3 \cdot \sin \theta \quad (5.41)$ $F_{4T} = F_3 \cdot \cos \theta \quad (5.42)$ <p>Pro $\iota < 0$:</p> $F_{4M} = F_3 \cdot \sin(180^\circ - \theta) \quad (5.43)$ $F_{4T} = F_3 \cdot \cos(180^\circ - \theta) \quad (5.44)$	<p>Člen ⑨ je zatížení pouze silou F_5, která působí v jeho ose.</p>
Člen ⑩, levá strana letounu:	Člen ⑩, pravá strana letounu:
$F_{5M} = \frac{F_{4M} \cdot p}{r} \quad (5.45)$ <p>Moment od síly F_{5M} je reakcí na moment od síly F_{4M}. Síla F_5 musí být spočtena pro opačnou hodnotu výchylky křídélka než na pravé straně (neplatí pro nulovou výchylku křídélka).</p> $F_5 = \frac{F_{5M}}{\cos \iota} \quad (5.46)$ $F_{5T} = F_{5M} \cdot \tan \iota \quad (5.47)$	<p>Moment od síly F_{5M} není reakcí na moment od síly F_{4M}, oba momenty působí stejným směrem. Reakcí na tyto momenty je moment od síly F_{6M}.</p>

Člen ⑪:	Člen ⑫:
$F_{6M} = \frac{F_{4M} \cdot p + F_{5M} \cdot r}{t} \quad (5.48)$	Člen ⑫ je zatížen pouze silou F_6 , která působí v jeho ose.
Pro $\iota \geq 0$:	
$\lambda = \iota - \kappa \quad (5.49)$	
Pro $\iota < 0$:	
$\lambda = \iota + \kappa \quad (5.50)$	
$F_{6T} = F_{6M} \cdot \operatorname{tg} \lambda \quad (5.51)$	
$F_6 = \sqrt{F_{6M}^2 + F_{6T}^2} \quad (5.52)$	

5.2.1 Uzel 4

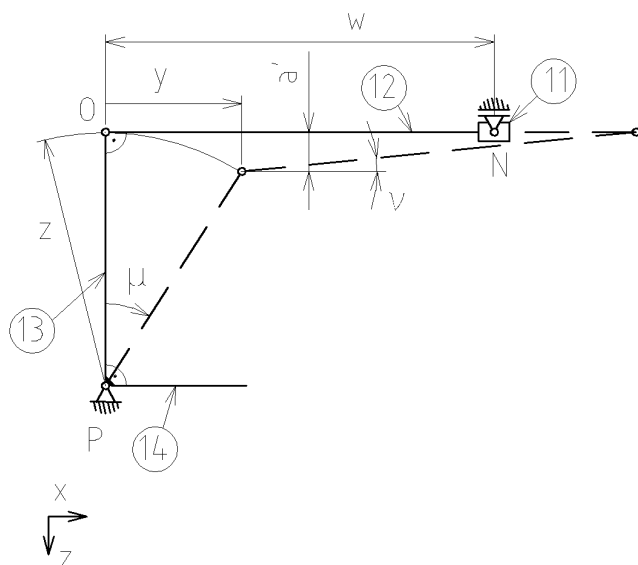
Uzel 4 je tvořen dvěma pákami ⑬ a ⑭, jejich společná osa rotace je rovnoběžná s osu y. Viz Obr. 5.17.



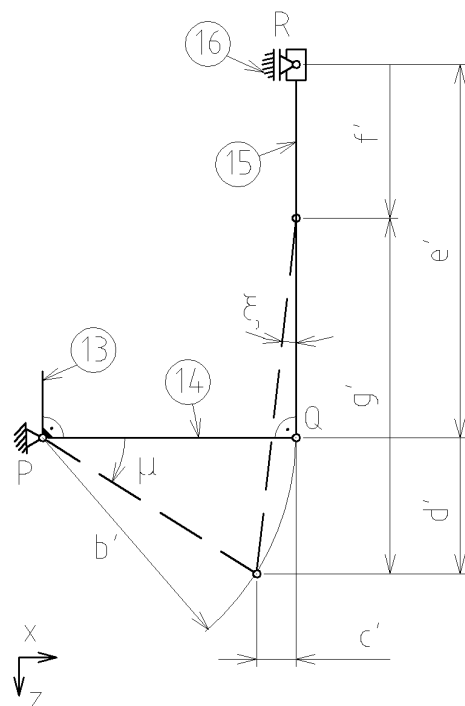
Obr. 5.17: Trasa řízení křidélek – uzel 4

10) Geometrie členů ⑬, ⑭ a ⑮ dle Obr. 5.18 a Obr. 5.19.

- c) Z CAD modelu odečteme hodnoty: z , b' , e' .
- d) Využijeme rovnic v Tab. 5.10.



Obr. 5.18: Člen ⑬, křídélko, geometrie



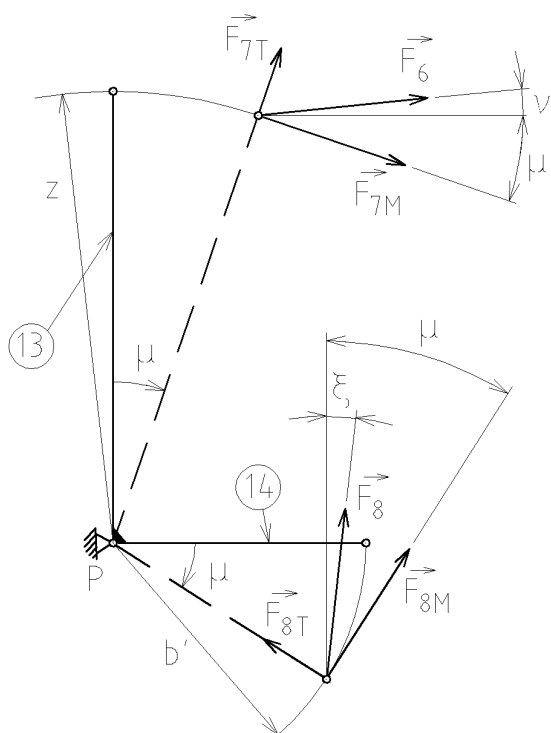
Obr. 5.19: Členy ⑭ a ⑮, křídélko, geometrie

Tab. 5.10: Výpočet geometrie členů ⑬, ⑭ a ⑮ křídélka

Člen ⑬:	Člen ⑭:
$\mu = \sin^{-1} \frac{y}{z}$ (5.53)	$c' = b' \cdot (1 - \cos \mu)$ (5.54)
$a' = z \cdot (1 - \cos \mu)$ (5.55)	$d' = b' \cdot \sin \mu$ (5.56)
$v = \sin^{-1} \frac{a'}{w}$ (5.57)	
Člen ⑮:	
$\xi = \sin^{-1} \frac{c'}{e'}$ (5.58)	
$g' = e' \cdot \cos \xi$ (5.59)	
Pro $\mu \geq 0$: $f' = d' + e' - g'$ (5.60)	
Pro $\mu < 0$: $f' = d' + g' - e'$ (5.61)	

11) Zatížení členů ⑬, ⑭ a ⑮ dle Obr. 5.20 a rovnic v Tab. 5.11.

Tab. 5.11: Výpočet zatížení členů ⑬, ⑭ a ⑮ křídélka

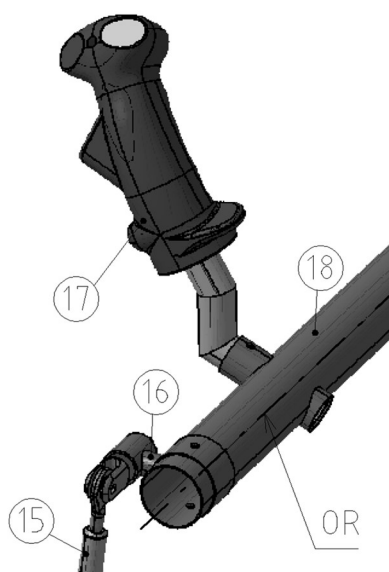


Obr. 5.20: Členy ⑬ a ⑭, křídélko, zatížení

Člen ⑬	
Pro $\mu \geq 0$	(5.62)
$\rho = \mu + \nu$	
Pro $\mu < 0$	(5.63)
$\rho = \mu - \nu$	
$F_{7M} = F_6 \cdot \cos \rho$	(5.64)
$F_{7T} = F_6 \cdot \sin \rho$	(5.65)
Člen ⑭	
$F_{8M} = \frac{F_{7M} \cdot z}{b'}$	(5.66)
Pro $\mu \geq 0$	(5.67)
$\sigma = \mu - \xi$	
Pro $\mu < 0$	(5.68)
$\sigma = \mu + \xi$	
$F_{8T} = F_{8M} \cdot \tan \sigma$	(5.69)
$F_8 = \frac{F_{8M}}{\cos \sigma}$	(5.70)
Člen ⑮	
Člen ⑮ je zatížen pouze silou F_8 , která působí v jeho ose.	

5.2.2 Uzel 5

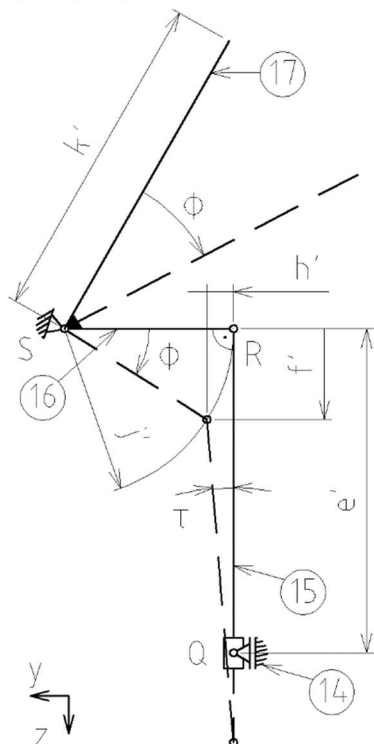
Uzel 5 se skládá z táhla ⑮, páky ⑯ a řídicí páky ⑰. Celá tato sestava se otáčí kolem osy trubky ⑱, která je zobrazená na Obr. 5.21.



Obr. 5.21: Trasa řízení křidélek – uzel 3

12) Geometrie členů ⑮, ⑯ a ⑰ dle Obr. 5.22.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: j' , k' .
- Využijeme rovnic v Tab. 5.12.

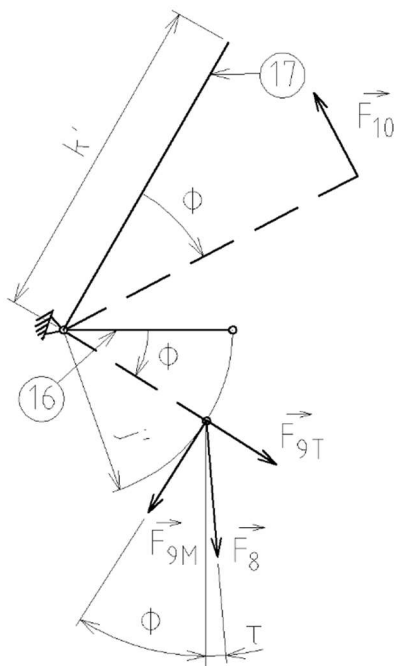


Obr. 5.22: Členy ⑮, ⑯ a ⑰, křídélko, geometrie

Tab. 5.12: Výpočet geometrie členů ⑯ a ⑰ křídélka

Člen ⑯	
$\phi = \sin^{-1} \frac{f'}{j'}$	(5.71)
$h' = j' \cdot (1 - \cos \phi)$	(5.72)
$\tau = \sin^{-1} \frac{h'}{e'}$	(5.73)

13) Zatížení členů ⑯ a ⑰ dle Obr. 5.23 a rovnic v Tab. 5.13.



Obr. 5.23: Členy ⑯ a ⑰, křídélko, zatížení

Tab. 5.13: Výpočet geometrie členů ⑯ a ⑰ křídélka

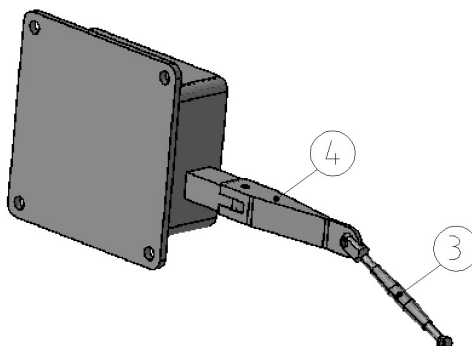
Člen ⑯	
Pro $\phi \geq 0$	(5.74)
$\chi = \phi + \tau$	(5.75)
Pro $\phi < 0$	(5.76)
$\chi = \phi - \tau$	(5.77)
$F_{9M} = F_8 \cdot \cos \chi$	(5.78)
$F_{9T} = F_8 \cdot \sin \chi$	
Člen ⑰	
$F_{10} = \frac{F_{9M} \cdot j'}{k'}$	(5.78)

Předpokládáme, že síla F_{10} , kterou pilot působí na řídicí páku je k řídicí páce vždy kolmá.

5.3 Zatížení trasy řízení vyvažovací plošky křidélek

5.3.1 Popis trasy řízení vyvažovací plošky křidélek

Vyvažovací ploškou je vybaveno pouze pravé křídélko. Ovládání je elektrické. V profilu křídélka je umístěna schránka se servomotorem, který přenáší lineární pohyb na táhla ③ a ④ a dále na páku vyvažovací plošky ②. Viz Obr. 5.24.

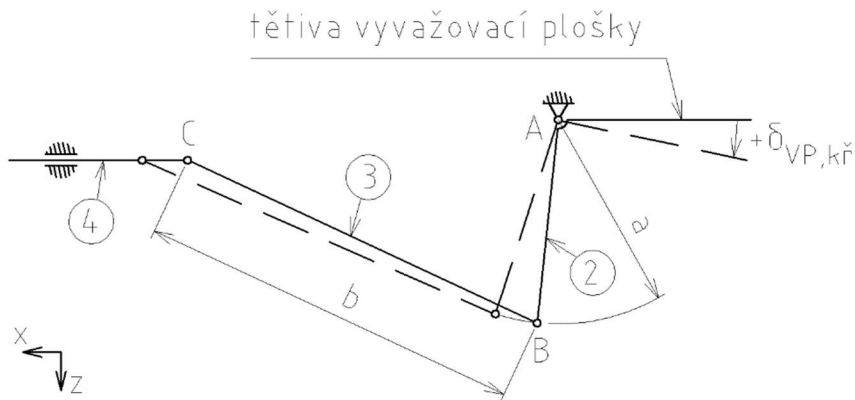


Obr. 5.24: Trasa řízení vyvažovací plošky pravého křídélka (pohled zleva, zezadu)

5.3.2 Postup výpočtu

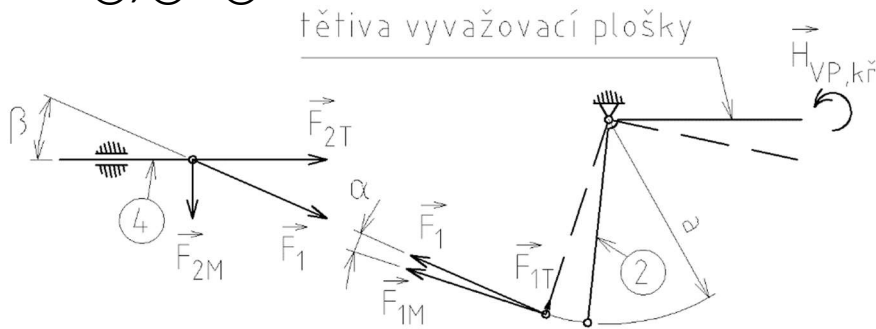
V tomto případě je celý mechanismus velmi jednoduchý a snadnější je grafické řešení s využitím programu Autodesk AutoCAD. Dále je uveden postup pro nulovou a maximální kladnou výchylku, obrázek pro určení geometrie při maximální kladné výchylce je uveden v příloze ().

1) Geometrie členů ②, ③ a ④ dle Obr. 5.25.



Obr. 5.25: Členy ②, ③ a ④, vyvažovací ploška křídélka, geometrie (1:1)

2) Zatížení členů ②, ③ a ④ dle Obr. 5.23 a rovnic v Tab. 5.14.



Obr. 5.26: Členy ②, ③ a ④, vyvažovací ploška křídélka, zatížení

Tab. 5.14: Výpočet zatížení členů ②, ③ a ④ vyvažovací plošky křídélka

Člen ②:	Člen ③:
$F_{1M} = \frac{H_{VP,kř}}{a}$ (5.79)	Člen ③ je zatížen pouze silou F_1 , která působí v jeho ose
$F_{1T} = F_{1M} \cdot \operatorname{tg} \alpha$ (5.80)	
$F_1 = \frac{F_{1M}}{\cos \alpha}$ (5.81)	
Člen ④:	
$F_{2M} = F_1 \cdot \sin \beta$ (5.82)	
$F_{2T} = F_1 \cdot \cos \beta$ (5.83)	

5.4 Zatížení trasy řízení výškového kormidla

5.4.1 Popis trasy řízení výškového kormidla

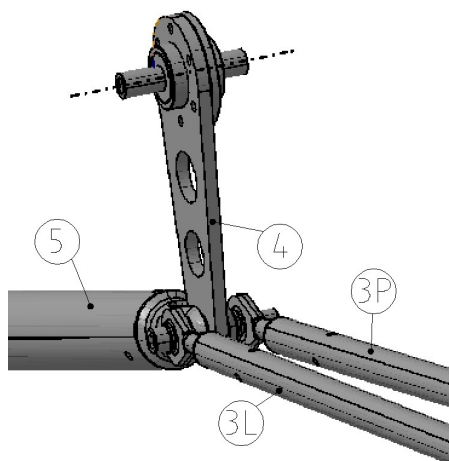
Řízení výškového kormidla je řešeno pomocí boční řídicí páky. Kormidlo je ovládáno lineárním posunutím páky vpřed/vzad. Mechanismus je složen z pák a trubkových táhel. Trasa řízení je na Obr. 5.27.



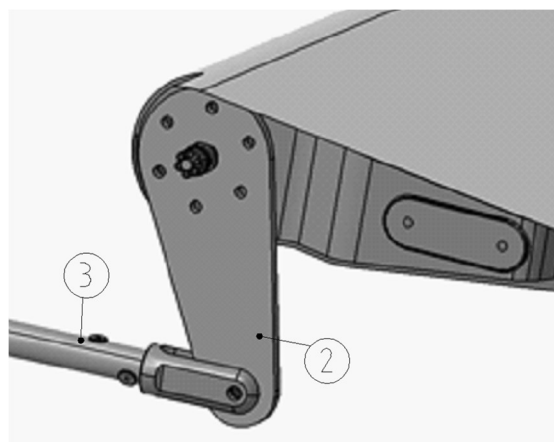
Obr. 5.27: Trasa řízení VK (pohled zprava, zezadu)

5.4.2 Uzel 1

Uzel 1 výškového kormidla obsahuje závěs samotného kormidla, táhla ③ a převodovou páku ④, které dohromady tvoří čtyřkloubový mechanismus (viz Obr. 5.29 a Obr. 5.28). Mezi členy ② a ③ není ve vchozí pozici pravý úhel, tzn. že vzniká rozdílný pohyb všech členů při maximální kladné a záporné výchylce kormidla. Tato diferenciací je však v dalších částech mechanismu vykompenzována.



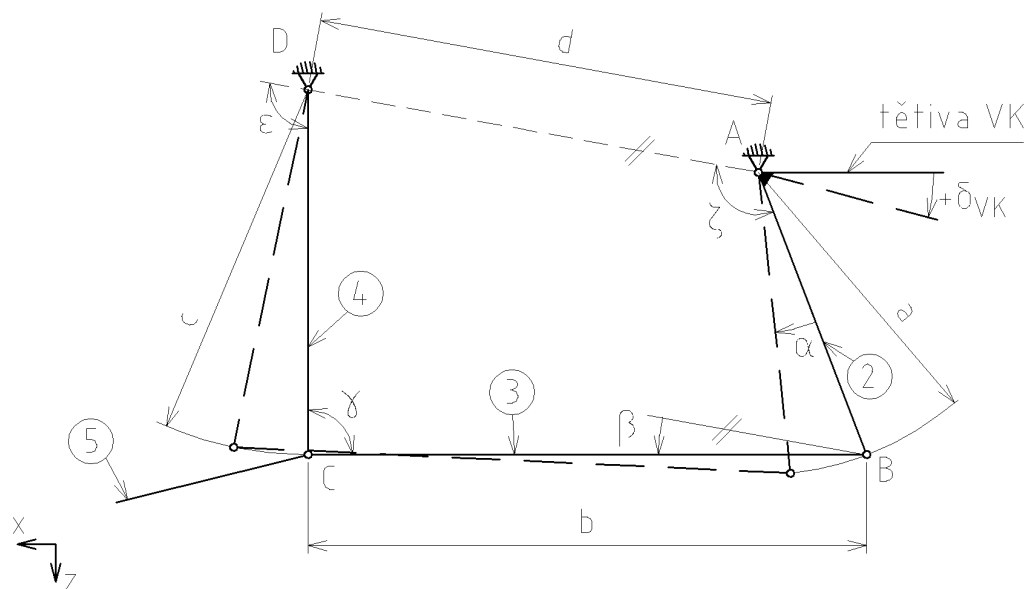
Obr. 5.28: Trasa řízení VK – uzel 1, část 2



Obr. 5.29: Trasa řízení VK – uzel 1, část 1, pravé výškové kormidlo

1) Geometrie členů ②, ③ a ④ dle Obr. 5.30.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: a , b , c , d , ζ_0 .
- Jedná se o obecný čtyřkloubový mechanismus. Pro jeho řešení využijeme rovnic v Tab. 5.15. Tyto rovnice jsou převzaty z publikace [8]⁹.



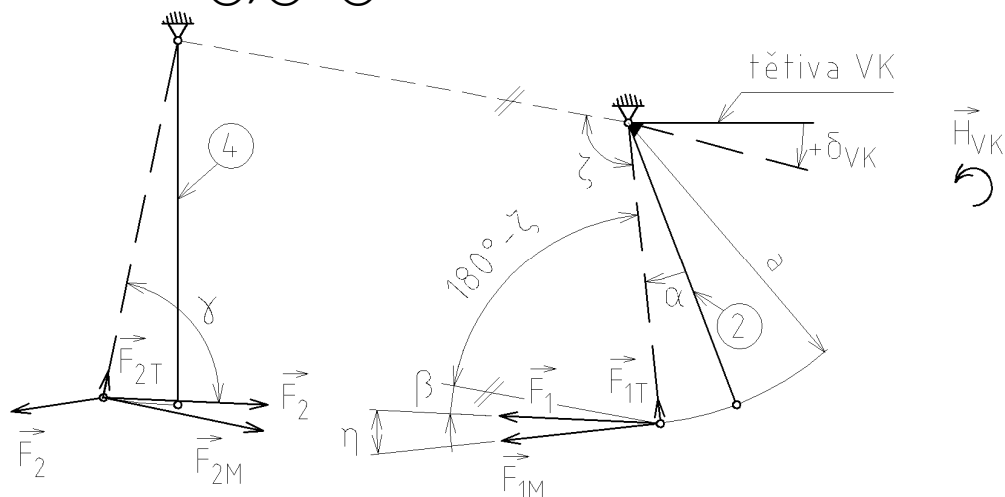
Obr. 5.30: Členy ②, ③ a ④, výškové kormidlo, geometrie

⁹ Jedná se o rovnice (4.9) až (4.12) ve zmíněné publikaci.

Tab. 5.15: Výpočet geometrie členů ②, ③ a ④ výškového kormidla

Člen ②:	
$\alpha = \delta_{VK}$	(5.84)
$\zeta = \alpha + \zeta_0$	(5.85)
$\overline{BD} = e = \sqrt{d^2 + a^2 - 2 \cdot d \cdot a \cdot \cos \zeta}$	(5.86)
$\beta = 2 \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-a \cdot \sin \zeta + c \cdot \sin \gamma}{d + b - a \cdot \cos \zeta - c \cdot \cos \gamma} \right)$	(5.87)
Člen ④:	
$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{b^2 + c^2 - e^2}{2 \cdot b \cdot c} \right)$	(5.88)
$\varepsilon = 2 \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a \cdot \sin \zeta - b \cdot \sin \gamma}{a \cdot \cos \zeta + c - d - b \cdot \cos \gamma} \right)$	(5.89)

2) Zatížení členů ②, ③ a ④ dle Obr. 5.31 a rovnic v Tab. 5.16.



Obr. 5.31: Členy ②, ③ a ④, výškové kormidlo, geometrie

Tab. 5.16: Výpočet zatížení členů ②, ③ a ④ výškového kormidla

Člen ②:	Člen ③:
$F_{1M} = \frac{H_{VK}}{a}$	Člen ③ je zatížen pouze silou F_1 , která působí v jeho ose.
$\eta = \zeta - \beta - 90^\circ$	
$F_{1T} = F_{1M} \cdot \operatorname{tg} \eta$	
$F_1 = \frac{F_{1M}}{\cos \eta}$	

Člen ④:

$$F_2 = 2 \cdot F_1 \quad (5.94)$$

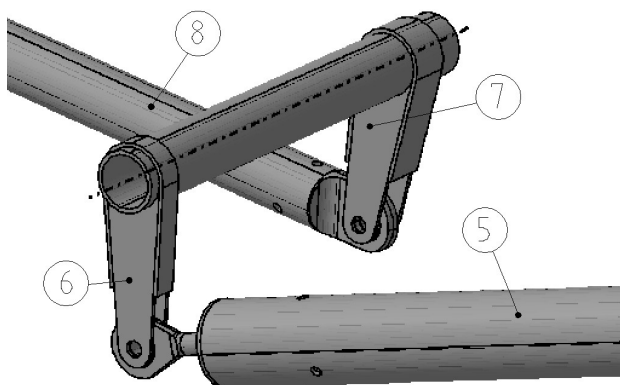
Síla F_2 je dvojnásobná oproti F_1 , protože na páku ④ jsou přivedeny dvě páky ③.

$$F_{2T} = F_2 \cdot \cos \gamma \quad (5.95)$$

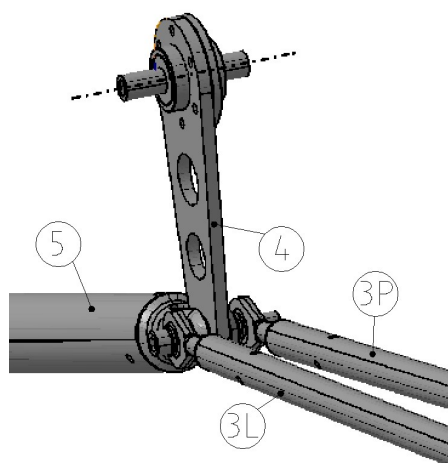
$$F_{2M} = F_2 \cdot \sin \gamma \quad (5.96)$$

5.4.3 Uzel 2

Uzel 2 je čtyř-klobový mechanismus dle Obr. 5.32 a Obr. 5.33. Tento mechanismus se skládá z pák ④ a ⑥ a táhla ⑤. Celá sestava leží v jedné rovině.



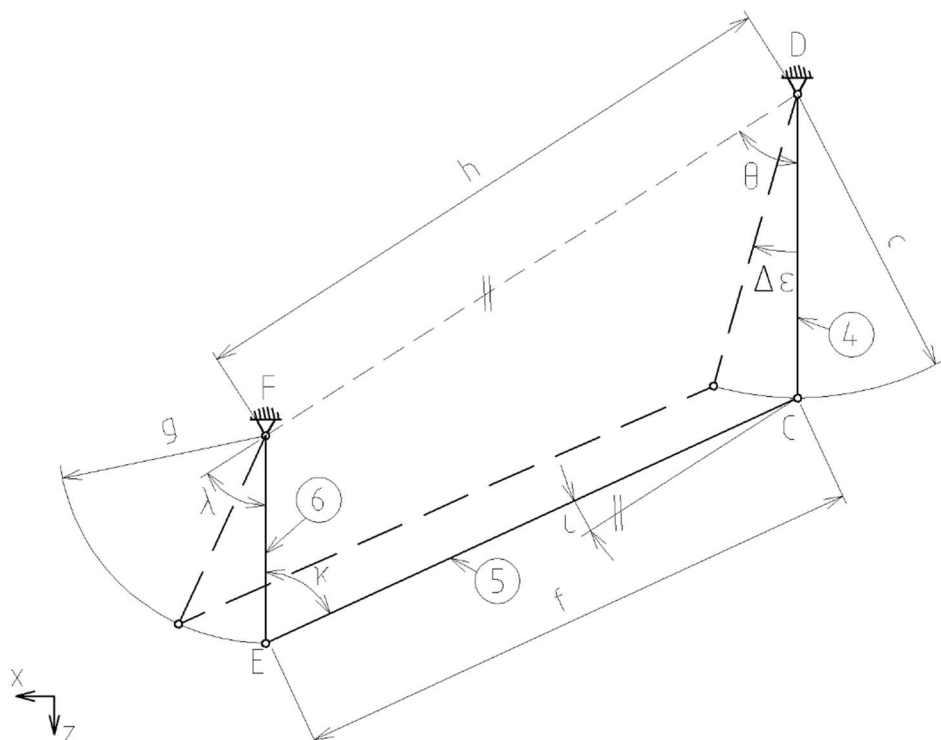
Obr. 5.32: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 2, část 1



Obr. 5.33: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 2, část 2

3) Geometrie členů ④, ⑤ a ⑥ dle Obr. 5.34.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: θ_0 , f , g , h .
- Jedná se o obecný čtyř-kolbový mechanismus. Řešíme stejně, jako v kroku 1).

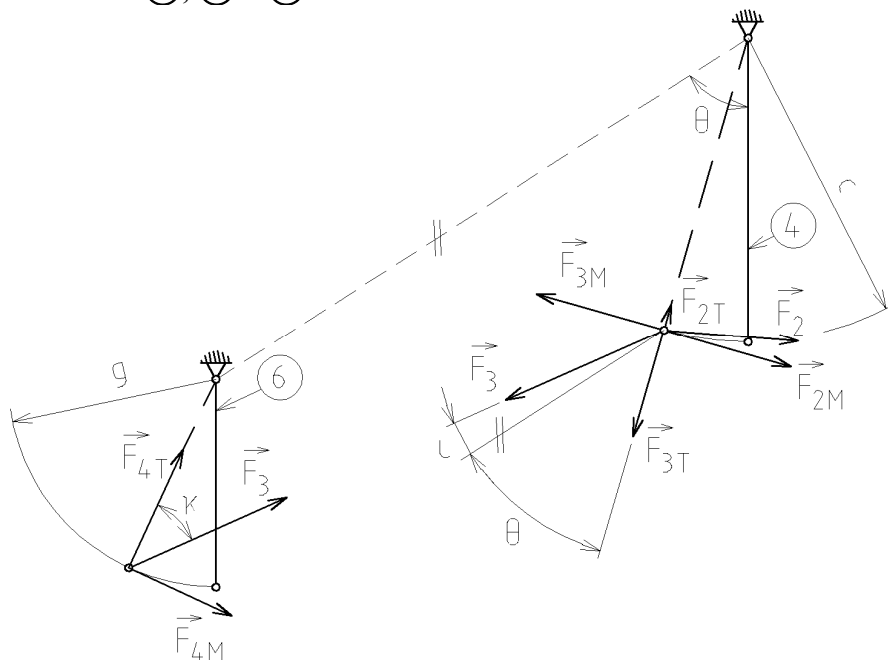


Obr. 5.34: Členy ④, ⑤ a ⑥, výškové kormidlo, geometrie

Tab. 5.17: Výpočet geometrie členů ④, ⑤ a ⑥ výškového kormidla

Člen ④:		
$\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon$		(5.97)
$\theta = \theta_0 - \Delta\varepsilon$		(5.98)
$\overline{CF} = j = \sqrt{h^2 + c^2 - 2 \cdot h \cdot c \cdot \cos \theta}$		(5.99)
$\iota = 2 \cdot tg^{-1} \left(\frac{-c \cdot \sin \theta + g \cdot \sin \kappa}{h + f - c \cdot \cos \theta - g \cdot \cos \kappa} \right)$		(5.100)
Člen ⑥:		
$\kappa = \cos^{-1} \left(\frac{f^2 + g^2 - j^2}{2 \cdot f \cdot g} \right)$		(5.101)
$\lambda = 2 \cdot tg^{-1} \left(\frac{c \cdot \sin \theta - f \cdot \sin \kappa}{c \cdot \cos \theta + g - h - f \cdot \cos \kappa} \right)$		(5.102)

4) Zatížení členů ④, ⑤ a ⑥ dle Obr. 5.35 a rovnic v Tab. 5.18.



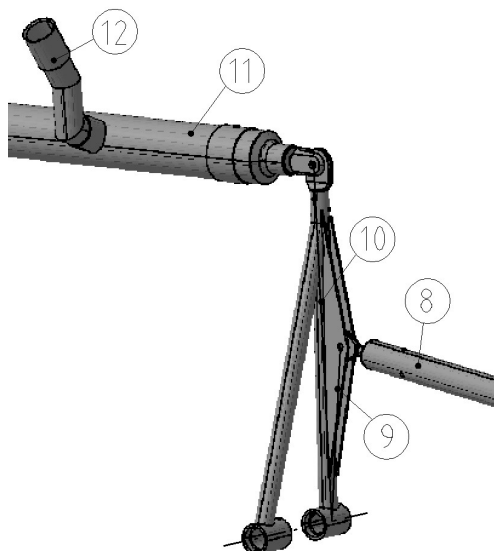
Obr. 5.35: Členy ④, ⑤ a ⑥, výškové kormidlo, zatížení

Tab. 5.18: Výpočet zatížení členů ④, ⑤ a ⑥ výškového kormidla

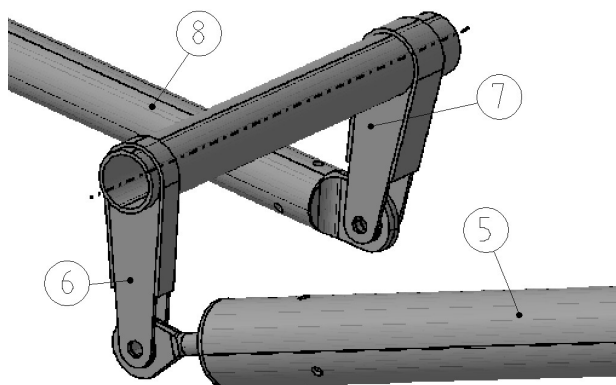
Člen ④:		Člen ⑤:
$F_{3M} = F_{2M}$	(5.103)	Člen ⑤ je zatížen pouze silou F_3 , která působí v jeho ose.
$F_{3T} = \frac{F_{3M}}{\operatorname{tg}(\iota + \theta)}$	(5.104)	
$F_3 = \frac{F_{3M}}{\sin(\iota + \theta)}$	(5.105)	
Člen ⑥:		
$F_{4T} = F_3 \cdot \cos \kappa$	(5.106)	
$F_{4M} = F_3 \cdot \sin \kappa$	(5.107)	

5.4.4 Uzel 3

Tento uzel tvoří opět čtyř-kloubový mechanismus složený z pák ⑦ a ⑨ a táhla ⑧. Viz Obr. 5.36 a Obr. 5.37. Páky ⑦ a ⑨ leží v rovnoběžných rovinách, které jsou od sebe vzdáleny 150 mm. Tato vzdálenost nebude dále uvažována, protože rozsah pohybů je relativně malý a zjednodušení na rovinný mechanismus přinese podstatné zjednodušení výpočtů.



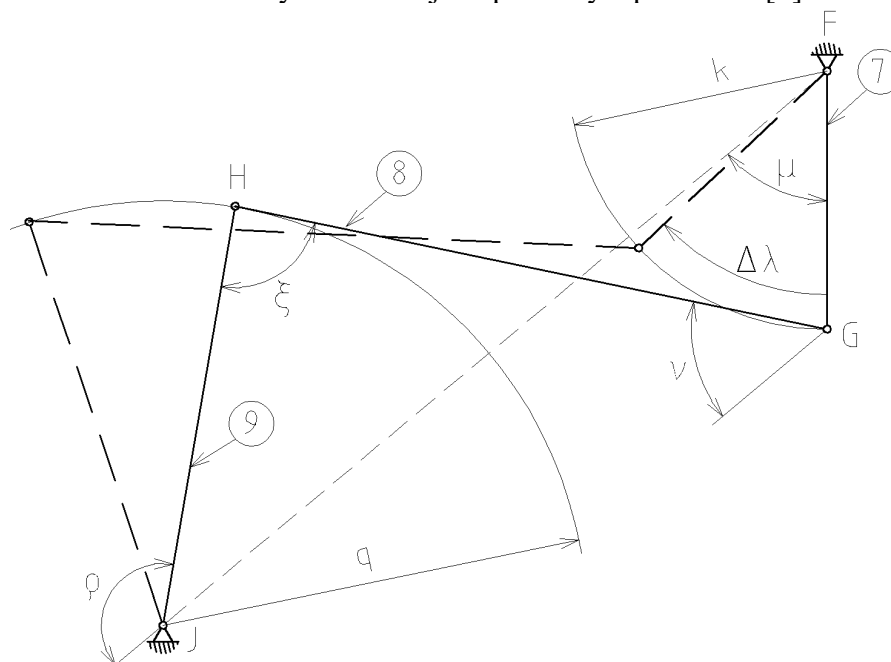
Obr. 5.36: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 3, část 1



Obr. 5.37: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 3, část 2

5) Geometrie členů ⑦, ⑧ a ⑨ dle Obr. 5.38.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: k , $\overline{FJ} = m$, $\overline{GH} = p$, q , μ_0 .
- Jedná se o obecný čtyř-kloubový mechanismus. Pro jeho řešení využijeme rovnic v Tab. 5.19. Tyto rovnice jsou převzaty z publikace [8]¹⁰.



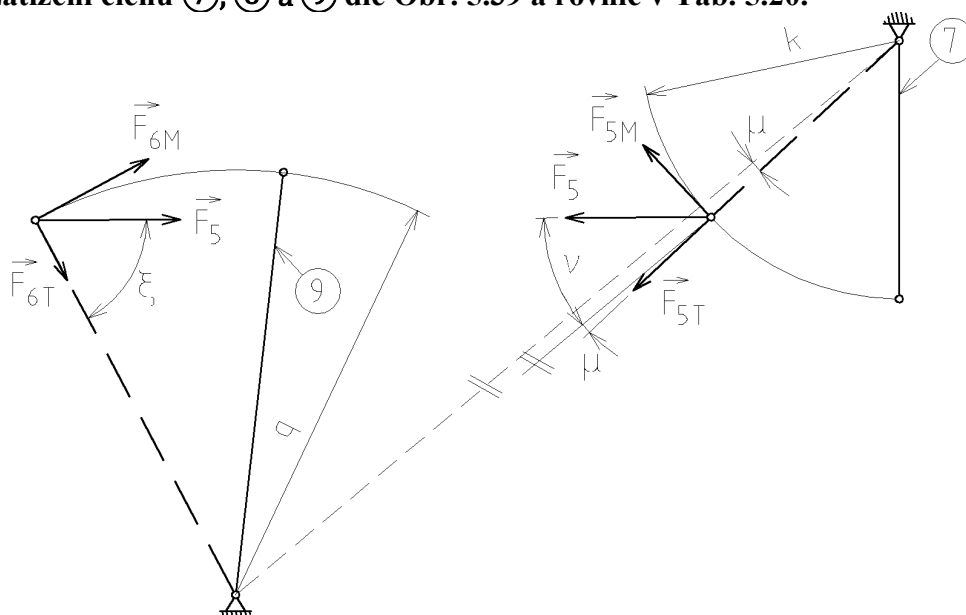
Obr. 5.38: Členy ⑦, ⑧ a ⑨, výškové kormidlo, geometrie

¹⁰ Jedná se o rovnice (4.9), (4.10), (4.13) a (4.14) ve zmíněné publikaci.

Tab. 5.19: Výpočet geometrie členů ⑦, ⑧ a ⑨ výškového kormidla

Člen ⑦:	
$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda$	(5.108)
$\mu = \mu_0 - \Delta\lambda$	(5.109)
$\overline{GJ} = n = \sqrt{m^2 + k^2 - 2 \cdot m \cdot k \cdot \cos \mu}$	(5.110)
$v = -2 \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-k \cdot \sin \mu - q \cdot \sin \xi}{m + p - k \cdot \cos \mu - q \cdot \cos \xi} \right)$	(5.111)
Člen ⑨:	
$\xi = \cos^{-1} \left(\frac{p^2 + q^2 - n^2}{2 \cdot p \cdot q} \right)$	(5.112)
$\rho = -2 \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{k \cdot \sin \mu + p \cdot \sin \xi}{k \cdot \cos \mu + q - m - p \cdot \cos \xi} \right)$	(5.113)

6) Zatížení členů ⑦, ⑧ a ⑨ dle Obr. 5.39 a rovnic v Tab. 5.20.



Obr. 5.39: Členy ⑦, ⑧ a ⑨, výškové kormidlo, zatížení

Tab. 5.20: Výpočet zatížení členů ⑦, ⑧ a ⑨ výškového kormidla

Člen ⑦:	Člen ⑧:
$F_{5M} = F_{4M}$ protože $k = g$	Člen ⑧ je zatížen pouze silou F_5 , která působí v jeho ose.
$F_{5T} = \frac{F_{5M}}{\operatorname{tg} (v + \mu)}$	
$F_5 = \frac{F_{5M}}{\sin(v + \mu)}$	
Člen ⑨:	
$F_{6T} = F_5 \cdot \cos \xi$	
$F_{6M} = F_5 \cdot \sin \xi$	

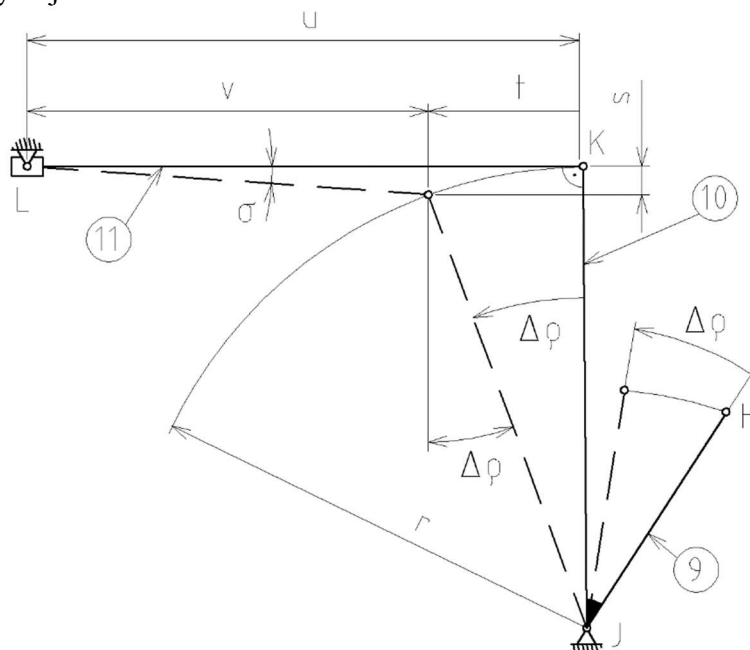
5.4.1 Uzel 4

Uzel 4 tvoří páka ⑩ a táhlo ⑪, viz Obr. 5.36. Táhlo ⑪ je v přední části uchyceno v posuvném čepu (vazba L na Obr. 5.40) a druhým koncem je spojeno s pákou ⑩ (vazba K).

7) Geometrie členů ⑦, ⑧ a ⑨ dle Obr. 5.40.

c) Z CAD modelu odečteme hodnoty: r , u .

d) Využijeme rovnic v Tab. 5.21.

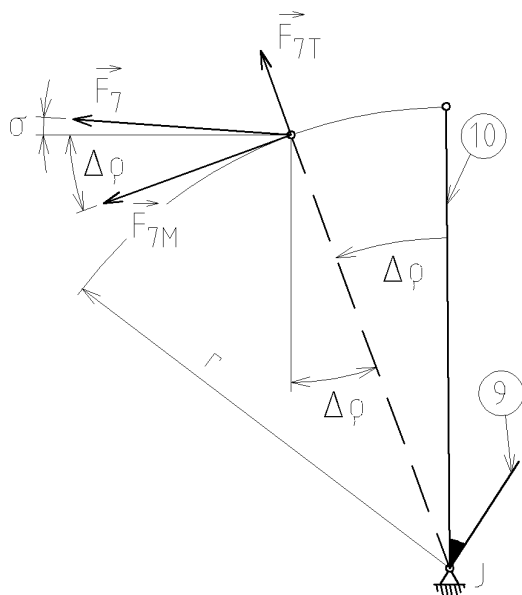


Obr. 5.40: Členy ⑩ a ⑪, výškové kormidlo, geometrie

Tab. 5.21: Výpočet geometrie členů ⑩ a ⑪ křidélka

Člen ⑩:	Člen ⑪:
$\Delta\rho = \rho_0 - \rho$ (5.119)	$v = u - t$ (5.120)
$t = r \cdot \sin \Delta\rho$ (5.121)	$\sigma = tg \frac{s}{v}$ (5.122)
$s = r \cdot (1 - \cos \Delta\rho)$ (5.123)	
Zde je třeba zkontrolovat, že platí: $\Delta\rho(\delta_{VK} = 25^\circ) = \Delta\rho(\delta_{VK} = -25^\circ)$. Tímto je zajištěno, že posuv řídicí páky pro max. výchylku VK nahoru/dolů bude stejný.	

8) Zatížení členů ⑩ a ⑪ dle Obr. 5.41 a rovnic v Tab. 5.22.



Obr. 5.41: Členy ⑩ a ⑪, výškové kormidlo, zatížení

Tab. 5.22: Výpočet zatížení členů ⑩ a ⑪ výškového kormidla

Člen ⑩	
$F_{7M} = \frac{F_{6M} \cdot q}{r}$	(5.124)
$F_{7T} = F_{7M} \cdot \operatorname{tg}(\sigma + \Delta\rho)$	(5.125)
$F_7 = \frac{F_{7M}}{\cos(\sigma + \Delta\rho)}$	(5.126)
Člen ⑪	
Člen ⑪ je zatížen pouze silou F_7 , která působí v jeho ose.	

Síla F_7 je zároveň síla, kterou působí pilot na řídicí páku.

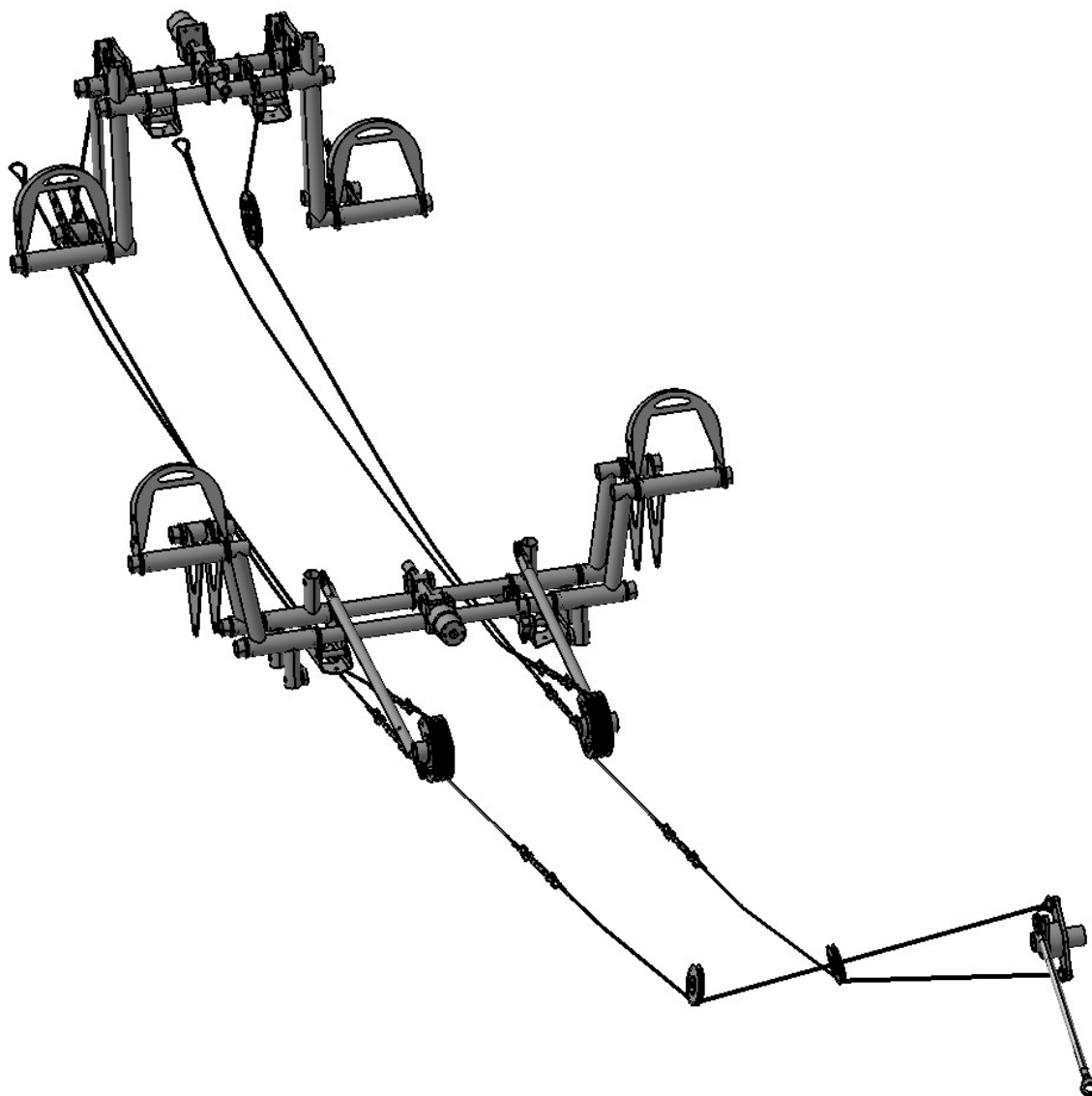
5.2 Zatížení trasy řízení směrového kormidla

Trasa řízení směrového kormidla zajišťuje, že při vyšlápnutí např. levého předního pedálu, dojde díky propojení ke stejnému pohybu i levého zadního pedálu. Naopak oba pravé pedály vykonají pohyb opačným směrem. Kvůli lanovému převodu však není zajištěn přenos výchylky zadního pedálu na odpovídající přední pedál. Protože by přenos zatížení případně propojení pravých a levých pedálů na úlohu staticky neurčitou, budeme uvažovat pouze propojení obou levých, resp. pravých pedálů, nikoliv propojení levé a pravé strany.

V tomto případě stačí uvažovat pouze jednu maximální výchylku kormidla. Výškové kormidlo má symetrický profil a je tam možné uvažovat, že k maximálnímu zatížení nedojde při nulové výchylce. Výchylka vpravo/vlevo se liší pouze tím, který pedál je zatížen.

5.2.1 Popis trasy řízení směrového kormidla

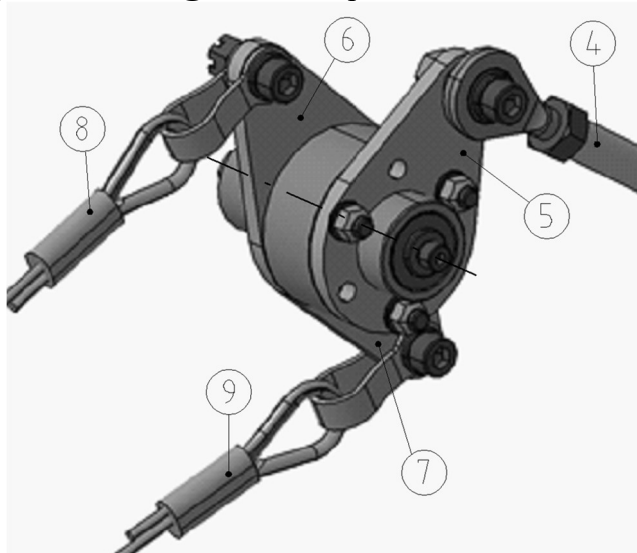
Řízení směrového kormidla je řešeno užitím pedálů. Vyšlápnutí pravého pedálu dojde zároveň k protipohybu levého pedálu a naopak. Pomocí sduřovacích klatek je zajištěn přenos výchylky pedálu z přední pozice na zadní a naopak. Mechanismus je složen z pák trubkových táhel a lan. Trasa řízení ne na Obr. 5.27.



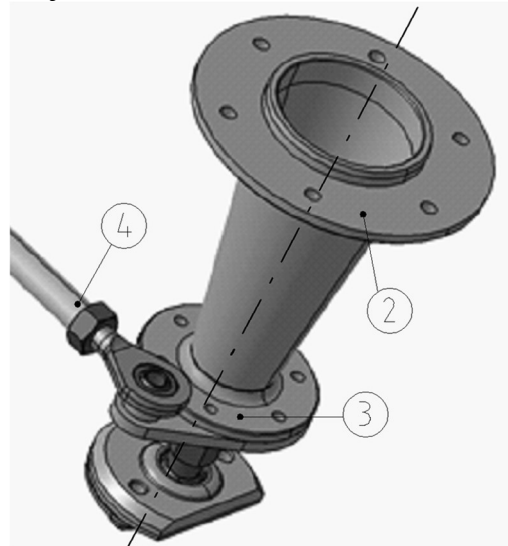
Obr. 5.44: Trasa řízení SK (pohled zleva, zezadu)

5.2.2 Uzel 1

Uzel 1 je tvořen trubkou s přírubami ② a ③. K přírubě ② je pomocí šroubů připevněno směrové kormidlo. Členy ③, ④ a ⑤ dohromady tvoří prostorový čtyřkloubový mechanismus, páky ③ a ⑤ se otáčejí v rovinách, které jsou vzájemně kolmé. Z páky ⑤ je síla dále rozváděna pákami ⑥ a ⑦, na které jsou připojena lana ⑧ a ⑨. Lano ⑨ vede k pravému pedálu a lano ⑧ k levému pedálu. Příslušná část řízení je zobrazena na Obr. 5.45 a Obr. 5.46.



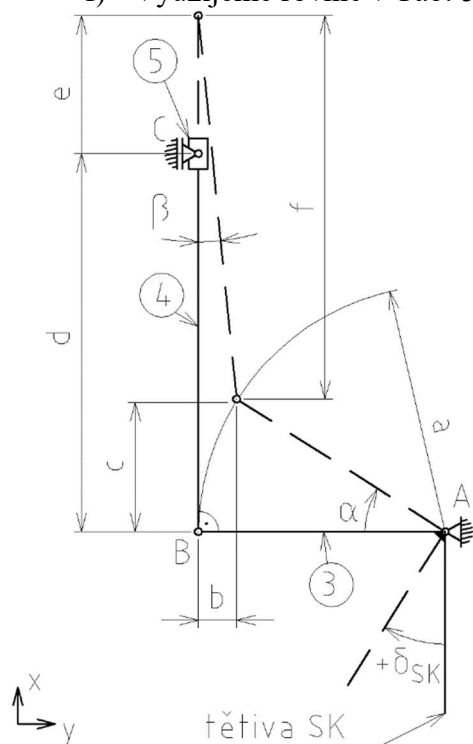
Obr. 5.45: Trasa řízení směrového kormidla – uzel 1, část 1



Obr. 5.46: Trasa řízení směrového kor-
midla – uzel 1, část 2

1) Geometrie členů ③ a ④ dle Obr. 5.47.

- Z CAD modelu odečteme hodnoty: a, d.
- Využijeme rovnic v Tab. 5.23.



Obr. 5.47: Členy ③ a ④, směrové kor-
midlo, geometrie

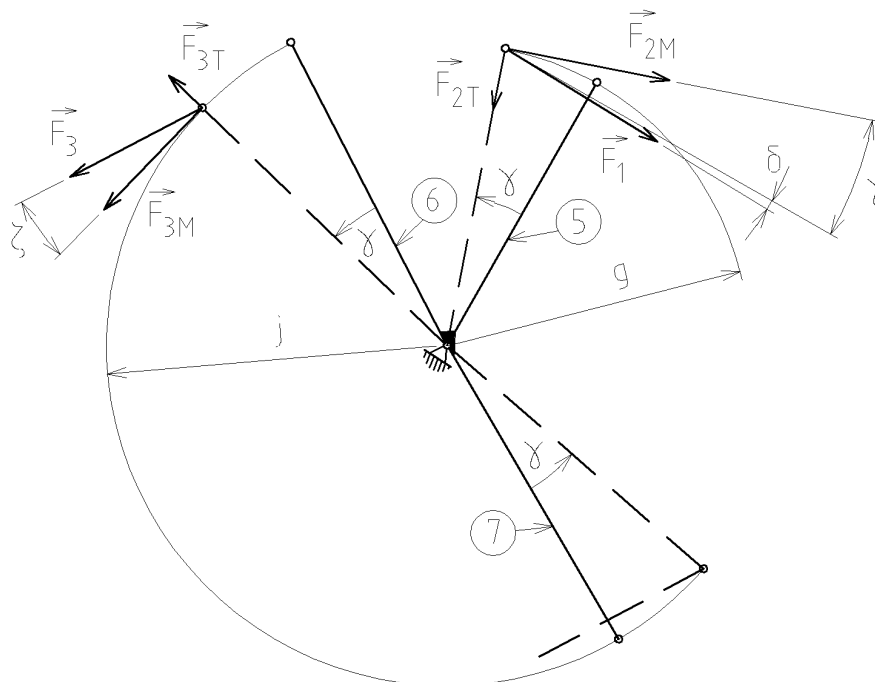
*Tab. 5.23: Výpočet zatížení členů ③ a ④
výškového kormidla*

Člen ②:	
$\alpha = \delta_{SK}$	(5.127)
$b = a \cdot (1 - \cos \alpha)$	(5.128)
$c = a \cdot \sin \alpha$	(5.129)
Člen ③:	
$\beta = \sin^{-1} \frac{b}{d}$	(5.130)
$f = d \cdot \cos \beta$	(5.131)
$e = c + f - d$	(5.132)

Tab. 5.25: Výpočet geometrie členů ④ a ⑤ směrového kormidla

Člen ④:	Člen ⑤:
$\delta = \sin^{-1} \frac{h}{d}$ (5.136)	$\gamma = \sin^{-1} \frac{e}{g}$ (5.137)
	$h = g \cdot (1 - \cos \gamma)$ (5.138)

4) Zatížení členů ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ a ⑨ dle Obr. 5.50 a rovnic v Tab. 5.26.



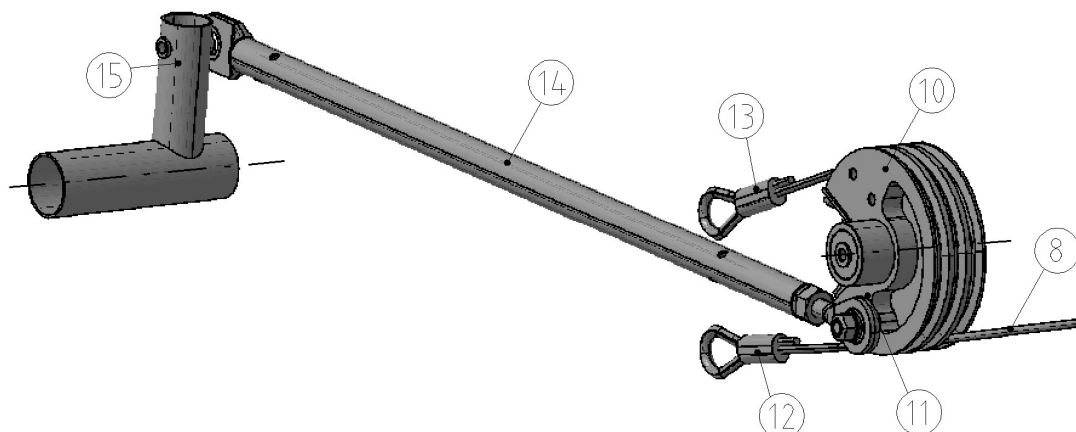
Obr. 5.50: Členy ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ a ⑨, směrové kormidlo, zatížení

Tab. 5.26: Výpočet geometrie členů ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ a ⑨ směrového kormidla

Člen ⑤:	Členy ⑥, ⑦:
$F_{2M} = F_1 \cdot \cos(\gamma + \delta)$ (5.139)	$F_{3M} = \frac{F_{2M} \cdot g}{j}$ (5.140)
$F_{2T} = F_1 \cdot \sin(\gamma + \delta)$ (5.141)	$F_{3T} = F_{3M} \cdot \operatorname{tg} \zeta$ (5.142)
	$F_3 = \frac{F_{3M}}{\cos \zeta}$ (5.143)
Člen ⑧:	Člen ⑨:
Člen ⑧ přenáší pouze tahovou sílu F_3 , která působí v jeho ose.	Člen ⑨ přenáší pouze tahovou sílu F_3 , která působí v jeho ose.
Členy ⑥ a ⑧ přenáší zatížení pouze při kladné výchylce směrového kormidla.	Členy ⑦ a ⑨ přenáší zatížení pouze při záporné výchylce směrového kormidla.

5.2.3 Uzel 2 – levá strana

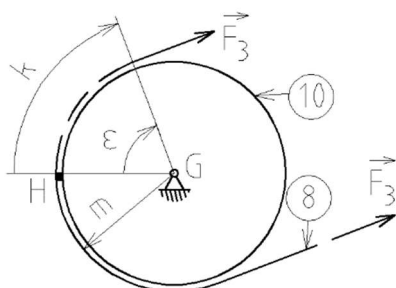
Uzel 2 tvoří rozváděcí kladka ⑩ spolu s táhlem ⑭ a pákou ⑮. Na kladku je přivedeno lano ⑧ od směrového kormidla. Lano ⑫ vede k přednímu levému pedálu. Lano ⑬ ve k pravé rozváděcí kladce, a tedy k pedálům na pravé straně. Jak bylo řečeno v úvodu kapitoly, propojení levých a pravých pedálů neuvažujeme.



Obr. 5.51: Trasa řízení směrového kormidla – uzel 2

5) Geometrie a zatížení členu ⑩ dle Obr. 5.52.

- g) Z CAD modelu odečteme hodnoty: m .
- h) Využijeme rovnic v Tab. 5.27.



Obr. 5.52: Členy ⑧ a ⑩, směrové kormidlo, geometrie

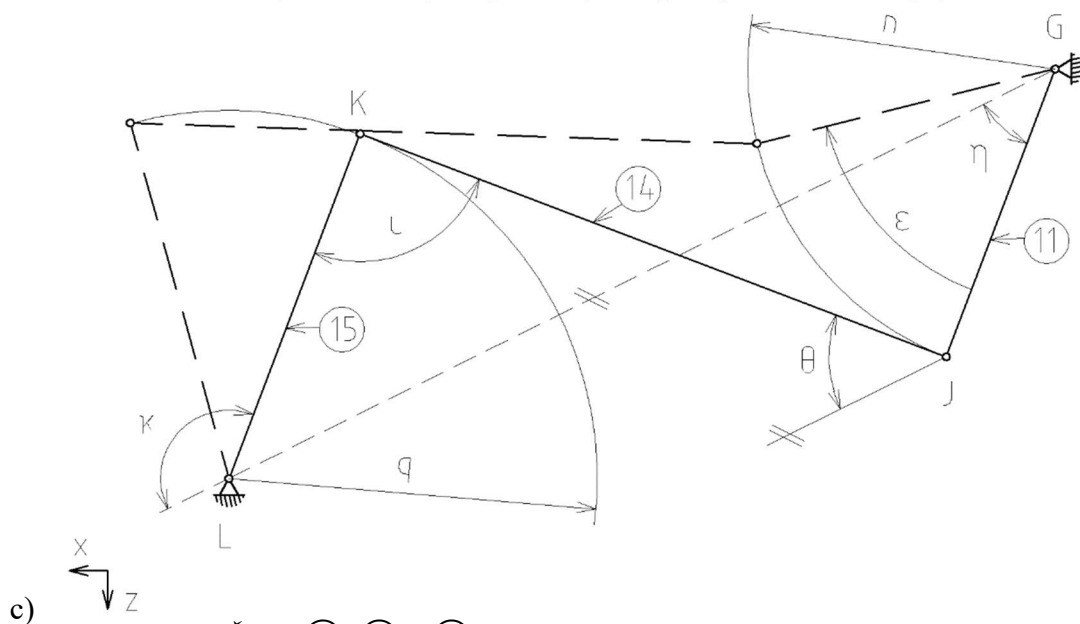
Tab. 5.27: Výpočet geometrie a zatížení členu ⑩ výškového kormidla

Člen ⑩:	
$\varepsilon = \frac{k}{m}$	(5.144)

Na člen ⑩ působí pouze síla F_3 . Lano ⑧ zajišťuje, že síla F_3 na tělese ⑩ působí vždy v tečném směru.

6) Geometrie členů ⑪, ⑭ a ⑮ dle Obr. 5.53.

- a) Z CAD modelu odečteme hodnoty: n , $JK = p$, $GL = r$, q , η_0 , ι_0 .
b) Jedná se o obecný čtyř-kloubový mechanismus. Pro jeho řešení využijeme rovnic v Tab. 5.19, tyto rovnice jsou převzaty z kapitoly 0, odstavec 5)b).

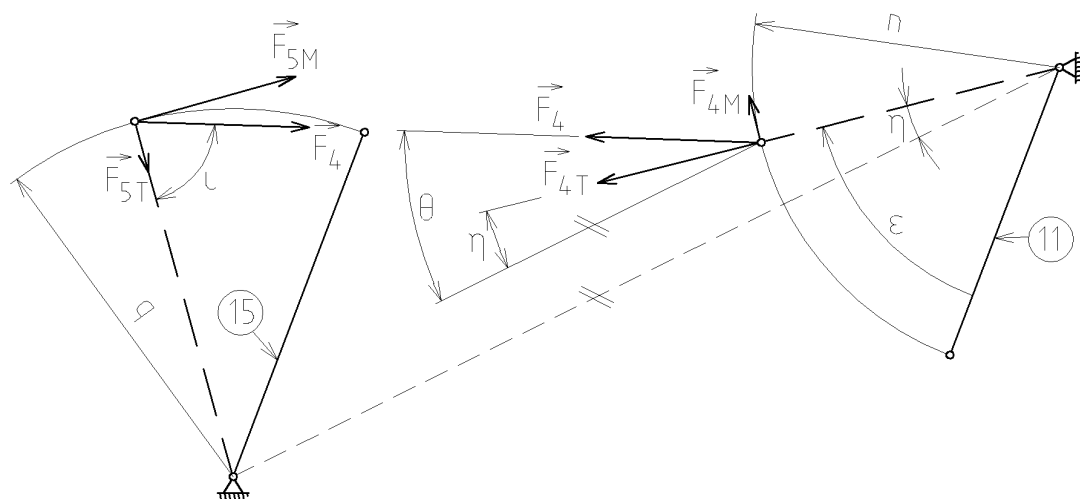


c) Obr. 5.53: Členy ⑪, ⑭ a ⑮, směrové kormidlo, geometrie

Tab. 5.28: Výpočet geometrie členů ⑪ a ⑮ směrového kormidla

Člen ⑪:	
$\bar{JL} = s = \sqrt{r^2 + n^2 - 2 \cdot r \cdot n \cdot \cos \eta}$	(5.145)
$\theta = -2 \cdot tg^{-1} \left(\frac{-n \cdot \sin \eta - q \cdot \sin \iota}{r + p - n \cdot \cos \eta - q \cdot \cos \iota} \right)$	(5.146)
Člen ⑮:	
$\iota = \cos^{-1} \left(\frac{p + q^2 - s^2}{2 \cdot p \cdot q} \right)$	(5.147)
$\kappa = -2 \cdot tg^{-1} \left(\frac{n \cdot \sin \eta + p \cdot \sin \iota}{n \cdot \cos \eta + q - r - p \cdot \cos \iota} \right)$	(5.148)

7) Zatížení členů ⑪, ⑭ a ⑮ dle Obr. 5.54 a rovnic v Tab. 5.29.



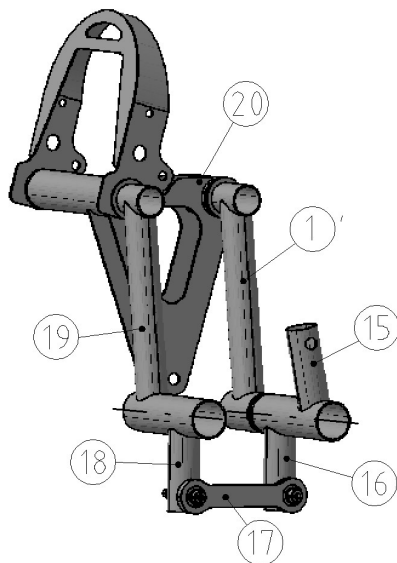
Obr. 5.54: Členy ⑪, ⑭ a ⑮, výškové kormidlo, zatížení

Tab. 5.29: Výpočet zatížení členů ⑪, ⑭ a ⑮ výškového kormidla

Člen ⑪:	Člen ⑭:
$F_{4M} = \frac{F_3 \cdot m}{n}$ (5.149)	Člen ⑭ je zatížen pouze silou F_4 , která působí v jeho ose.
$F_{4T} = \frac{F_{4M}}{\operatorname{tg}(\theta - \eta)}$ (5.150)	
$F_4 = \frac{F_{4M}}{\sin(\theta - \eta)}$ (5.151)	
Člen ⑮:	
$F_{5T} = F_4 \cdot \cos \iota$ (5.152)	
$F_{5M} = F_4 \cdot \sin \iota$ (5.153)	

5.2.4 Uzel 3 – levý zadní pedál

Uzel 3 je tvořen pákami (15), (16), (18) a (19) a spojovacím táhlem (17). Členy (20) a (1)' slouží k připevnění brzdového válce a k jeho správnému pohybu. Pření pedály fungují stejně.



Obr. 5.55: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 3

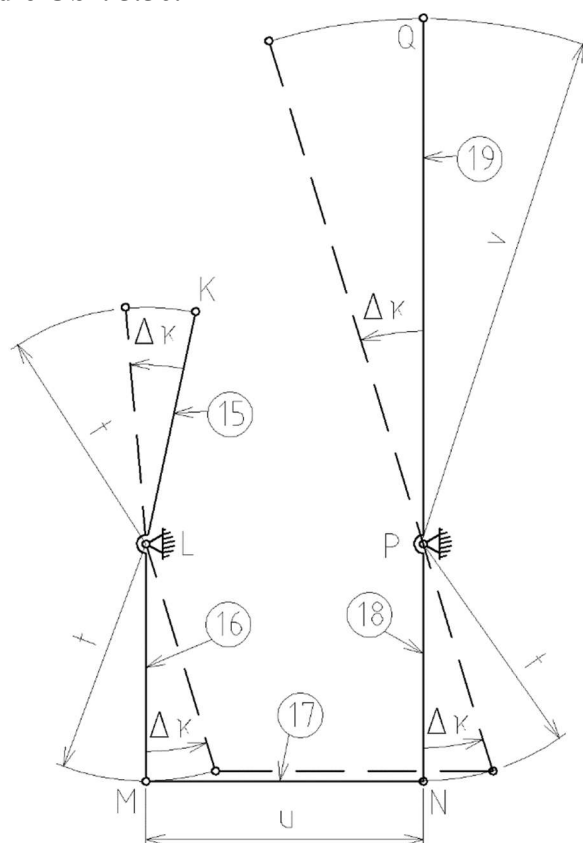
8) Geometrie a zatížení členů (15) až (19) dle Obr. 5.56.

a) Z CAD modelu odečteme hodnoty:

t, u, v .

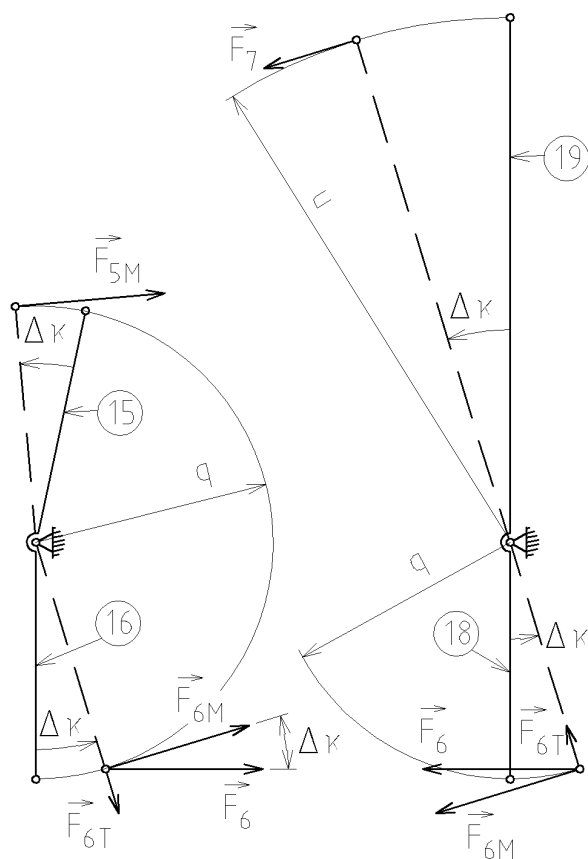
b) Využijeme rovnice (5.154).

$$\Delta\kappa = \kappa_0 - \kappa \quad (5.154)$$



Obr. 5.56: Členy (15) až (19), výškové kormidlo, geometrie

9) Zatížení členů ⑮ až ⑲ dle Obr. 5.57 a rovnic v Tab. 5.30.



Obr. 5.57: Členy ⑮ až ⑲, směrové kormidlo, zatížení

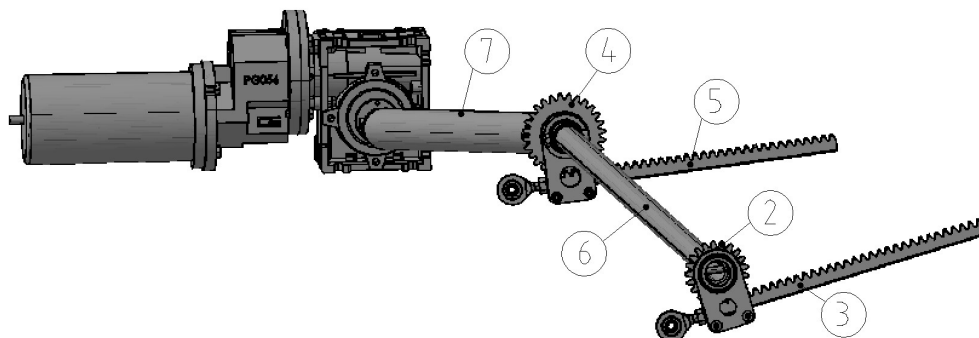
Tab. 5.30: Výpočet zatížení členů ⑮ až ⑲ výškového kormidla

Členy ⑮, ⑲	
$F_{6M} = F_{5M}$	(5.155)
$F_{6T} = F_{6M} \cdot \operatorname{tg} \Delta \kappa$	(5.156)
$F_6 = \frac{F_{6M}}{\cos \Delta \kappa}$	(5.157)
Člen ⑰	
Člen ⑰ je zatížen pouze silou F_6 , která působí v jeho ose.	
Člen ⑱	
$F_7 = \frac{F_{6M} \cdot q}{u}$	(5.158)
Předpokládáme, že pilot působí silou F_7 vždy kolmo k páce ⑱.	

5.3 Zatížení trasy řízení vztlakových klapek

5.3.1 Popis trasy řízení vztlakových klapek

Klapky jsou ovládány elektricky. V kabině pilotů je páka, která zapíná elektromotor, který pohání soustavu torzních trubek. Přenos krouticího momentu z trasy řízení na kormidla je řešen pomocí ozubených kol a hřebenů. Trasa řízení je na Obr. 5.58.



Obr. 5.58: Trasa řízení klapek (pravé křídlo, zezadu)

5.3.1 Postup výpočtu

V tomto případě není nutné určovat změnu geometrie po vychýlení klapky. Z klapky se přenáší tlaková síla na ozubený hřeben, který přes ozubené kolo způsobuje krouticí moment. Tento je přenášen torzními trubkami až do hnacího motoru s převodovkou.

Přenos zatížení z klapky na oba ozubené hřebeny je úloha staticky neurčitá. Síla se rozděluje v poměru krutových tuhostí jednotlivých částí řízení. V tomto případě by byl výpočet zřejmě poměrně nepřesný. Snadnější bude uvažovat, že celou sílu přenáší vždy jen jeden hřeben.

Tab. 5.31: Geometrie a zatížení vztlakové klapky

Hodnota	Jednotka	Člen		
		②	④	③, ⑤
poloměr ozubeného kola	[mm]	21	27	
síla od klapky	[N]			497
krouticí moment	[Nmm]	10345	13301	

5.4 Shrnutí výsledků

Výsledná zatížení řídel jsou shrnuta v Tab. 5.32. Z tabulky plyne, že žádná síla nepřekračuje požadavky předpisu, jak bylo očekáváno. V případě systémů sekundárního řízení by bylo třeba vypočtené hodnoty srovnat s maximálními výkony příslušných aktuátorů, ty však nebyly zjištěny.

Tab. 5.32: Výsledná zatížení řídel

Řídídl	Vypočtená max. síla	Max. síla požadovaná předpisem [2]	Splněno
řídící páka (klonění)	126	133	✓
řídící páka (klopení)	211	267	✓
pedály	433	667	✓
ovládání VP křidélek	77		
ovládání VP VK	429		
ovládání klapek	26,6		

6 MODIFIKACE TRAS ŘÍZENÍ

Z předchozí kapitoly vyplynulo, že stávající systém primárního řízení bude vyhovovat i pro letoun s vyšší vzletovou hmotností. Vypočtené síly se v případě křidélek však od maximálních dovolených příliš neliší a v případě modifikací letounu by mohlo dojít ke zvýšení zatížení. Z těchto důvodů a také proto, že jedním z cílů této práce je modifikace systému řízení, budou dále, alespoň stručně, navrženy možnosti modifikace tras primárního řízení. Z praktického hlediska však bude lepší žádné změny v systému neprovádět.

Cílem modifikace samozřejmě je zachovat co největší část stávající kinematiky. Zejména proto, že systém řízení je plně odzkoušen na letounu TL Stream a provádět větší změny v něm by nemělo smysl. Vzhledem k tomu, že je celá trasa řízení popsána rovnicemi v taublce Excelu, lze velmi jednoduše pomocí iterací určit modifikované rozměry. Je třeba zároveň brát ohledy na prostorové rozložení součástí uvnitř letounu.

Návrh je proveden pro zvýšení současných závěsových momentů o 25 %.

Nejvýhodněji se jeví možnost změn délek převodových pák. Toto je výhodné i z hlediska pevnostních poměrů, protože v případě, že by modifikovaná součást nebyla schopná přenést zatížení, bylo by možné přistoupit k zesílení této součásti (větší tloušťka plechu v případě pák, nebo větší tloušťka stěny trubky v případě táhel). Zesílení by zároveň nemělo žádný vliv na prostorové rozložení součástí.

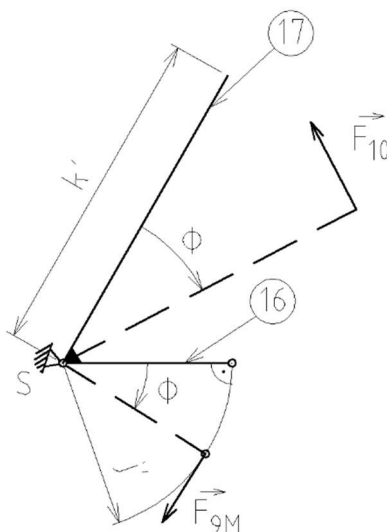
Výpočet v Excelu je připraven tak, že ze závěsového momentu a výchylky kormidla určuje další veličiny až po sílu na řídidle a jeho výchylku. Při jakýchkoliv změnách je nutné kontrolovat výslednou výchylku řídidla, která musí být stejná jako před modifikací.

Jako příklad postupu je uvedena možnost modifikace části řízení křidélek. Na Obr. 6.1 je jako číslo ⑰ označena řídící páka a jako ⑯ páka, která přenáší zatížení od křídélka. Celá sestava se otáčí kolem bodu S. Cílem je snížit sílu F_{10} , tedy tu, kterou musí vyvinout pilot. Platí momentová rovnováha k bodu S:

$$F_{10} \cdot k' = F_{9M} \cdot j' \quad (6.1)$$

Ke snížení síly F_{10} (síla F_{9M} zůstává konstantní) je možné provést některou z těchto úprav:

- zvětšení rozměru k – povede zároveň k většímu posuvu konce páky,
- zmenšení rozměru j – povede zároveň ke změně úhlu ϕ .



Obr. 6.1: Postup modifikace části řízení

V případě, že bude na páku ⑰ připojen další člen, změní se výchylky i v ostatních částech řízení. Tento problém je ale možné řešit modifikací jiné páky. Při modifikaci rozměrů v Excelu, tedy stačí měnit rozměry různých pák a zároveň sledovat, zda zůstane zachována výchylka řídidla, která musí být stejná jako před modifikací.

6.1 Křídélka

Vhodné místo pro modifikace je zde převod mezi pákami ⑧, ⑪ a ⑬. Uvnitř letounu je v tomto místě dost prostoru pro navrženou změnu rozměrů. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Tab. 6.1: modifikované rozměry řízení křidélek.

	Původní hodnota	Modifikovaná hodnota
t [mm]	47,5	70
z [mm]	40	58
p [mm]	69,5	60
ϕ [°]	36,6	37,3

Změna výchylky řídicí páky ϕ o hodnotě $0,7^\circ$ není podstatná.

Naopak nevhodné by bylo zasahovat do uzlu 1, kde okolní konstrukce nedovoluje potřebné změny rozměrů. Tuto variantu také není vhodné použít z toho důvodu, že pohybu členu ⑦ byl určen graficky.

6.2 Výškové kormidlo

V případě zvýšení závěsového momentu o 25 %, nedojde k překročení maximálních dovolených řídicích sil. Další zvyšování závěsového momentu se jeví jako nereálně vysoké.

V systému řízení výškového kormidla má největší vliv na síly páky ⑨. Změnou její délky se dosáhne snížení síly v řízení a zároveň zvětšení posuvu řídicí páky. Toto lze vykompenzovat zkrácením páky ⑦.

6.3 Směrové kormidlo

U směrového kormidla je rezerva pro maximální sílu v pedálech více než 50 % a nemá význam navrhovat jakoukoliv modifikaci.

7 PEVNOSTNÍ KONTROLA

Pevnostní kontrola tras řízení je provedena pro stávající trasy řízení. Modifikace uvedená v předchozí kapitole neodpovídá skutečným zatížením.

Systém řízení je složen z jednoduchých součástí, proto je zde dostatečný výpočet mezních stavů pomocí prosté pružnosti a pevnosti a výpočtů běžně používaných v letectví.

Dále je uveden pouze obecný postup kontroly. Výsledky jsou uvedeny v příloze (Příloha G).

7.1 Požadavky předpisu

Předpis CS-23 Amdt. 5 v bode CS23.2300 opět pouze stručně uvádí, že musí být zajištěn přenos zatížení při všech možných letových podmínkách. Proto použijeme zásady ze staršího vydání Amdt. 3, které by měly výše uvedené body splňovat. Problematiky zatížení tras řízení se týkají body CS 23.391 až CS 23.415. Část předpisu CS23.395 vyžaduje, aby byla trasa řízení navržena na 1,25 násobek vypočtených závěsových momentů nebo na síly v řízení uvedené v Tab. 7.1. Síly uvedené v Tab. 7.1 jsou v tomto případě vyšší, proto je použijeme při výpočtu. Výše uvedených sil se dosáhne pomocí závěsových momentů, které jsou v předposledním sloupci stejné tabulky a platí pro trasy řízení TL Trainer určené v kapitole 5. V letectví se pro pevnostní návrh běžně používá součinitel bezpečnosti o velikosti 1,5, touto hodnotou vynásobíme potřebné závěsové momenty a dostaneme tak početní zatížení. Součinitel bezpečnosti při dalších výpočtech tak musí být větší než 1.

Tab. 7.1: Maximální síly od pilota pro určení největšího zatížení tras řízení [2]

Řídicí prvek	Max. síly od pilota (požadavek předpisu)	Potřebný závěsový moment pro TL Trainer	
		provozní zatížení	početní zatížení
Řídicí páka (křídélka)	298 N	35,1 Nm	52,6 Nm
Řídicí páka (výškové kormidlo)	743 N	52,5 Nm	78,8 Nm
Pedály	890 N	39,8 Nm	59,7 Nm

7.2 Trubková táhla

7.2.1 Výpočet

Táhla tvoří duralové trubky zakončené okem nebo vidlicí, která je uvnitř trubky přinýtována. Materiál je uveden v Tab. 7.2. Typické táhlo s okem je na Obr. 7.2. Ovládání vyvažovacích plošek křidélek a výškového kormidla je navíc sestaveno z táhel, které tvoří kruhové tyče plného průřezu. U nich provedeme kontrolu stejně.

Tab. 7.2: Vlastnosti materiálu táhel – dural 2014 [9]

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Mez kluzu	Rm	255	[MPa]
Mez pevnosti	Rp0,2	390	[MPa]
Modul pružnosti	E	72000	[MPa]

1) Tahové / tlakové namáhání [10]

$$\sigma_{tah,tlak} = \frac{F}{S} \quad (7.1)$$

kde: σ ... normálové napětí [MPa]

F ... síla v ose trubky [N]

S ... nejmenší plocha příčného řezu stěny trubky dle rovnice (7.2) a Obr. 7.1 (uvažujeme plochu zmenšenou o díry pro nýty atp.) [mm²]

$$S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} - n \cdot d_1 \cdot s \quad (7.2)$$

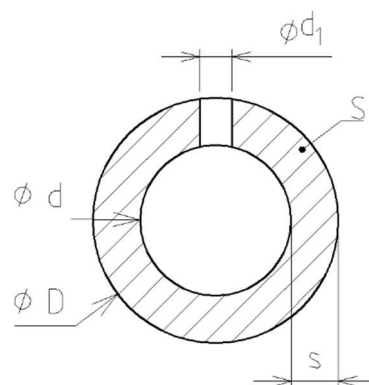
kde: D ... vnější průměr [mm],

d ... vnitřní průměr [mm],

d_1 ... průměr díry pro nýt, šroub [mm],

s ... tloušťka stěny trubky [mm],

n ... počet děr [-].



Obr. 7.1: Průřezová plocha táhla

Součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu:

$$k_{tah/tlak} = R_{p0,2} \frac{\sigma_{tah/tlak}}{\sigma_{tah/tlak}} \quad (7.3)$$

2) Stabilita při tlakovém namáhání [11]

Nejprve vypočteme štíhlosti:

$$\lambda_{m,red} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{R_{p0,2}}} \quad (7.4)$$

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{\frac{J_{min}}{S}}} \quad (7.5)$$

$$\lambda_{red} = \frac{\lambda}{\sqrt{c}} \quad (7.6)$$

kde: λ ... štíhlost prutu [-]

l ... délka prutu [mm]

E ... modul pružnosti v tahu [MPa]

$R_{p0,2}$... mez kluzu [MPa]

J_{min} ... minimální kvadratický moment [mm⁴]

S ... plocha příčného průřezu táhla [mm²]

c ... koeficient zohledňující typ vazby, pro obousranou rotační vazbu $c = 1$

Ověříme použitelnost metody, musí platit:

$$\lambda_{red} > \lambda_{m,red} \quad (7.7)$$

Kritická síla dle Euler:

$$F_{kr,Euler} = c \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l^2} \quad (7.8)$$

Tam, kde není možné použít Eulerovo řešení, použijeme řešení v nepružném oboru dle Tetmajera. Určí se kritické napětí:

$$\sigma_{kr,Tet} = R_m - \frac{(R_m - R_{p0,2})}{\lambda_{m,red}} \quad (7.9)$$

A dále kritická síla:

$$F_{kr,Tet} = \sigma_{kr,Tet} \cdot S \quad (7.10)$$

nakonec se určí součinitel bezpečnosti:

$$k = \frac{F_{kr,Euler}}{F_{tlak}} \quad (7.11)$$

7.2.2 Výsledky

Výsledné hodnoty bezpečností jsou shrnuty v Tab. 7.3 a Tab. 7.4. Nevyhovuje pouze táhlo ⑭ směrového kormidla. Jedná se o trubku o průměru 14×12 mm, pro vyhovění požadavku na vzpěrnou stabilitu bude použita trubka 14×10 mm.

Tab. 7.3: Výsledky pevnostní kontroly trubkových táhel (horní hodnota je pro tah, dolní pro tlak)

$k_{tah/tlak}$ [-]	k_{Eul} [-]	k_{Tet} [-]	$k_{tah/tlak}$ [-]	k_{Eul} [-]
Křídélka			VK	
⑤	7,1		③	9,2
	9,8	7,9		7,3
				1,1
⑥	13,4		⑤	14,7
	21,6	3,0		13,0
				1,6
⑦	9,2		⑧	11,0
	12,7	1,6		9,0
				3,6
⑨	7,9		⑪	16,8
	6,5	1,2		14,6
				7,5
⑫	3,4		SK	
	3,4	1,7	④	4,8
⑮	3,6			4,8
	3,6	6,1	⑭	2,4
				2,4
				0,97
			④	4,8
				4,8
				2,2

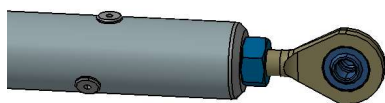
Tab. 7.4: Výsledky pevnostní kontroly tyčových táhel (horní hodnota je pro tah, dolní pro tlak)

$k_{tah/tlak}$ [-]	k_{Eul} [-]	k_{Tet} [-]
VP křidélek		
③	19,1	13,1
VP VK		
③	20,4	3,4
④	40,7	70,1

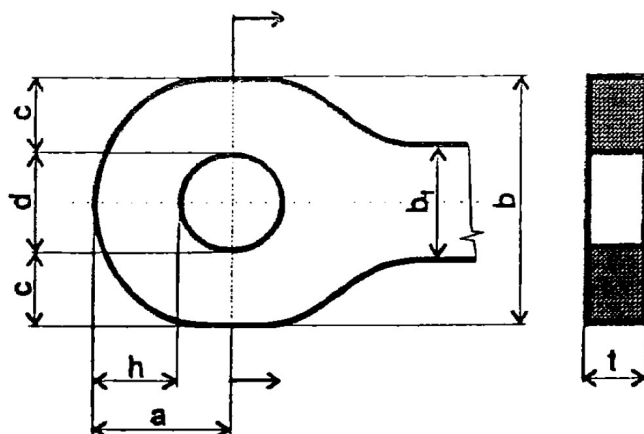
7.3 Vidlice, oka a jejich spoje

7.3.1 Výpočet

V systému řízení jsou použita jednoduchá oka (Obr. 7.2) a dvojité vidlice. Materiálem je ocel, podrobnosti jsou uvedeny v Tab. 7.5. Jejich kontrola se provede dle publikace [9]. Na Obr. 7.3 jsou uvedeny rozměry oka potřebné pro výpočet. V příloze (Příloha F) jsou uvedeny grafy a tabulky pro určení součinitelů f a k .



Obr. 7.2: Táhlo řízení zakončené jednoduchým okem



Obr. 7.3: Rozměry pro výpočet oka

Tab. 7.5: Materiál ok a vidlic

L-VARD.4	
R _m	490 MPa
R _{p0,2}	295 MPa

1) Utržení

$$\sigma = 1,15 \cdot \frac{F}{2 \cdot c \cdot t} \quad (7.12)$$

Součinitel bezpečnosti:

$$k_u = \frac{R_m}{\sigma} \quad (7.13)$$

2) Vysmeknutí čepu a roztržení oka

$$\sigma_{otl} = \frac{F}{d \cdot t} \quad (7.14)$$

Součinitel bezpečnosti:

$$k_{otl} = \frac{\sigma_{pk,otl}}{\sigma_{otl}} \quad (7.15)$$

3) Utržení s ohledem na deformaci

$$\sigma = 1,15 \cdot \frac{F}{2 \cdot c \cdot t} \quad (7.16)$$

Součinitel bezpečnosti:

$$k_{u,d} = \frac{\sigma_{pk}}{\sigma} \quad (7.17)$$

kde:

$$\sigma_{pk} = 0,735 \cdot R_{p0,2} \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{1}{0,75} \quad (7.18)$$

4) Vysmeknutí čepu a roztržení oka s ohledem na deformaci

$$\sigma_{otl} = \frac{F}{d \cdot t} \quad (7.19)$$

Součinitel bezpečnosti:

$$k_{otl,d} = \frac{\sigma^*_{pk,otl}}{\sigma} \quad (7.20)$$

kde:

$$\sigma_{pk} = 0,735 \cdot R_{p0,2} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{1}{0,75} \quad (7.21)$$

5) Kontrola čepů na střih

Materiál čepů je uveden v Tab. 7.2

Tab. 7.6: Vlastnosti materiálu čepů – ocel L-W6H.6 [9]

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Mez kluzu	Rm	640	[MPa]
Mez pevnosti	Rp0,2	390	[MPa]
Modul pružnosti	E	210000	[MPa]

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \quad (7.22)$$

Součinitel bezpečnosti:

$$k_{\text{čep}} = \frac{\tau_d}{\tau} \quad (7.23)$$

kde:

$$\tau_d = 0,6 \cdot R_m \quad (7.24)$$

6) Kontrola nýtů ve spojení oka s táhlem

Zatížení od táhla se rovnoměrně rozdělí na jednotlivé nýty. Provede se kontrola nýtů na střih, stejně jako v předchozím kroku.

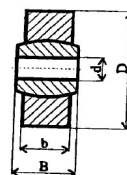
7) Kontrola únosnosti kloubových ložisek

Spojení každého oka s vidlicí je vybaveno kloubovým ložiskem pro kompenzaci stranových pohybů. únosnost těchto ložisek je dána v Tab. 7.7. Největší síla, která se vyskytuje v jakémkoliv oku / vidlici je dle dat v příloze (Příloha G) $F = 3,7$ kN. Při porovnání s únosností pro nejmenší oko v Tab. 7.7 je zřejmé, že všechna ložiska budou bezpečně naddimenzována.

Tab. 7.7: Únosnost kloubových ložisek [9]

d [mm]	D [mm]	b [mm]	B [mm]	ČSN 02 3511 Pr [N]	ČSN 02 3512 Pr [N]
4	12	3	5	21 600	10 800
5	14	4	6	36 000	18 000
6	14	4	6	36 000	18 000
8	17	5	8	58 500	29 250
10	20	6	9	75 600	37 800

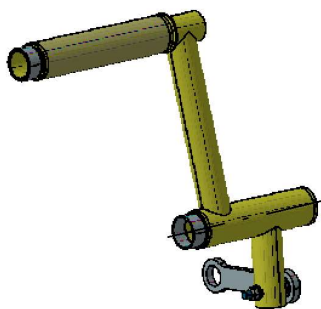
ČSN 02 3511 - nepohyblivé spoje
ČSN 02 3512 - pohyblivé spoje



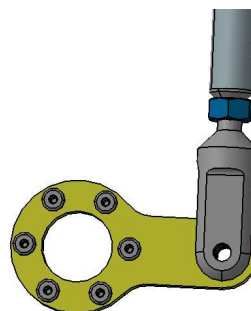
7.4 Páky

V soustavě řízení se vyskytují dva druhy pák dle Obr. 7.4 a Obr. 7.5. V obou případech určíme ohybové napětí v kritickém řezu. U pedálových pák zkontroluje svar v kořeni a u pák řízení zkontrolujeme přenos zatížení přes šrouby. Kritický řez u pák řízení je ve svaru u osy rotace a u pák řízení je jím místo, kde přechází páka v kruhovou přírubu. Materiálem je ocel, stejná jako v Tab. 7.6.

V případě plochých pák bude uvažována jen ohybová síla, tahová složka je oproti ní zanedbatelná.



Obr. 7.4: Sestava pák pedálu



Obr. 7.5: Páka řízení s připojeným táhlem

7.4.1 Postup

1) Ohybové napětí v kořeni páky [10]

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F \cdot r}{W_o} \quad (7.25)$$

kde: M_o ... ohybový moment [Nmm]
 F ... síla způsobující moment [N]
 r ... rameno síly k nebezpečnému průřezu [mm]
 W_o ... modul průřezu, určeno dle tabulek [9] [mm³]

Součinitel bezpečnosti:

$$k_o = \frac{R_m}{\sigma_o} \quad (7.26)$$

2) Kontrola šroubového spojení [12]

$$F = \frac{M}{r \cdot n} \quad (7.27)$$

kde: M_o ... krouticí moment [Nmm]
 F ... síla na jeden nýt [N]
 r ... rameno síly ke středu smyku [mm]
 n ... počet nýtů

3) Kontrola šroubů na střih stejně jako v předchozí kapitole

7.4.2 Výsledky

Trubkové páky dle Tab. 7.8 nedosahují požadovaných bezpečností. Páky jsou tvořeny trubkami o průměru 18×20 mm. Pro dosažení bezpečnosti větší než 1 volíme trubky o průměru 16×20 mm.

Tab. 7.8: Výsledné bezpečnosti trubkových pák

SK	k
	[-]
⑮	0,97
⑯, ⑱	0,97
⑲	0,97

Ploché páky všechny splňují pevnostní požadavky. Pevnostní rezerva je dostatečná i po zvážení zanedbání tahové složky.

Tab. 7.9: Výsledné bezpečnosti plochých pák

	k_o [-]	k [-]
křídélka		
③	7,8	23,0
④	8,7	20,7
⑩	1,9	4,3
⑪	2,7	7,8
⑬	3,4	11,3
⑭	3,4	11,3
VP křídélka		
②	23,8	36,9
VK		
②	10,7	14,7
VP VK		
②		111,5

7.5 Lana

Únosnost lan, která se vyskytují pouze v systému řízení výškového kormidla, vyhodnotíme dle Tab. 7.10. Lana použitá v letounu TL Trainer mají průměr 3 mm, maximální zatížení je potom 3,7 kN. Při porovnání těchto údajů s Tab. 7.10 lze konstatovat, že stávající lana budou dostatečně silná.

Tab. 7.10: Únosnost ocelových lan [9]

Průměr lana [mm]	Síla [N], při které nastane přetržení lana			
	02 4320.45	02 4321.65	02 4322.65	024323.65
2	1690	2460		
2,5	2640	3840		
3,15			5730	6680
3,55			7180	8400
4			8960	10400
4,5			11200	
5				16560
6,3				26640
8				41680
10				66400

7.6 Trasa řízení klappek

Trasa řízení klappek je složena z trubek, čepů, ozubených kol a ozubených hřebenů. Materiál trubek je stejný jako v případě táhel. Materiál čepů a ozubení odpovídá Tab. 7.6 V tomto případě uvažujeme, že jedno z ozubených kol přenáší vždy 100 % zatížení od klapky, jak je vysvětleno v kapitole 5.3.1.

7.6.1 Výpočet

1) Smykové napětí v trubce od krutu [10]

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \quad (7.28)$$

kde: τ ... smykové napětí [MPa]
 M_k ... krouticí moment [Nmm]
 W_k ... modul průřezu [mm³]
 Součinitel bezpečnosti:

$$k_1 = \frac{\tau_{dov}}{\tau_k} \quad (7.29)$$

Pro dovolené smykové napětí použijeme odhad dle rovnice (7.24).

2) Kontrola spojovacích čepů [10]

Ve spojích ozubeného kola s trubkami a spojích sousedních trubek jsou použity čepy zatížené na stříh. Materiál je stejný jako v Tab. 7.2. Hodnoty potřebné pro výpočet jsou patrné z Obr. 7.6.

Síla na čep:

$$F = \frac{M_k}{D} \quad (7.30)$$

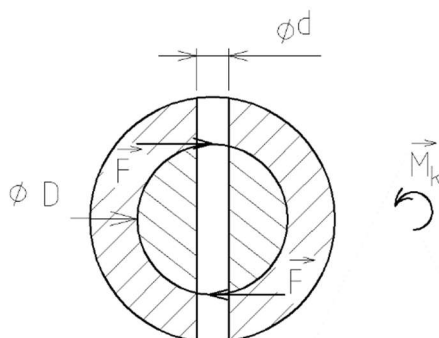
Smykové napětí:

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (7.31)$$

Součinitel bezpečnosti:

$$k_2 = \frac{\tau_{dov}}{\tau_k} \quad (7.32)$$

Pro dovolené smykové napětí použijeme odhad dle rovnice (7.24).



Obr. 7.6: Výpočet střižného čepu

3) Kontrola ozubení [12]

Provedeme jednoduchou kontrolu, kdy uvažujeme zub jako vetknutý nosník, na konci zatížený silou kolmou k jeho ose. Materiál ozubení je stejný jako v Tab. 7.6.

Ohybové napětí:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{f \cdot l}{\frac{b \cdot h^2}{6}} \quad (7.33)$$

Koeficient bezpečnosti:

$$k_o = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_o} \quad (7.34)$$

Smykové napětí:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{b \cdot h} \quad (7.35)$$

Koeficient bezpečnosti:

$$k_s = \frac{\tau_{dov}}{\tau} \quad (7.36)$$

7.6.2 Výsledky

Opět lze pouze konstatovat, že všechny prvky trasy řízení klapky z pevnostního hlediska vyhovují. Nejnebezpečnější místa jsou v kořeni zubů obou ozubených kol. Zde by byla, v případě potřeby, snadná náprava pomocí zvětšení tloušťky těchto kol.

Tab. 7.11: Výsledné bezpečnosti pro trasu řízení klapky

trubky	k_1	čepy	k_2	ozubení	k_o	k_s
	[-]		[-]		[-]	[-]
⑥	10,7	② - ⑥	5,1	②	1,2	8,7
⑦	31,6	④ - ⑥	5,1	③	5,0	28,7
		④ - ⑦	7,1	④	1,8	11,8
		⑦ - motor	7,9	⑤	5,0	28,7

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo určit zatížení řídicích ploch, přepočíst jej přes kinematiku řízení až na řídicí síly, které se srovnají s předpisem. Dále měly být navrženy konstrukční úpravy řízení v případě, že by byly překročeny řídicí síly dané předpisem, což se však nestalo. Na závěr měla být provedena pevnostní kontrola.

V úvodu je krátce představen letoun TL Trainer a okolnosti vzniku celého projektu. Letoun je zařazen z hlediska stavebních předpisů dle požadavků výrobce do kategorie CS-23 Level 2. Předpis CS-23 bude pro certifikace použit ve verzi Amendment 5, které se má při návrhu vyhovět. Problémem však je, že toto vydání obsahuje pouze všeobecně formulované požadavky. Proto je při dalším postupu odkazováno na vydání Amendment 3, který obsahuje konkrétní postupy ověření stanovených požadavků.

Výpočet zatížení aerodynamických kormidel je proveden dle dodatku A předpisu CS-23 Amdt. 3. Dodatek A stanovuje nejhorší případ rozložení zatížení po ploše kormidla. Toto tlakové zatížení se následně využije k výpočtu závěsového momentu jednotlivých kormidel. Výjimkou jsou pouze vztakové klapky, které do systému řízení nepřenáší moment ale sílu. Přesnějších výsledků by bylo možné dosáhnout pomocí CFD analýzy, která však byla nad rámec této práce.

Kinematika řízení je vyřešena rozdělením na rovinné části. Byly zanedbány některé, relativně zanedbatelné pohyby, které by vyžadovaly řešení mechanismu v prostoru, což by bylo neúměrně náročné. Byly určeny polohy jednotlivých částí systému řízení při nulové a obou maximálních výchylkách. Dále byla pro všechny tyto tři případy vypočtena zatížení jednotlivých prvků. Stěžejním bodem této části byl výpočet řídicích sil, které byly porovnány s požadavky předpisu. Bohužel však vypočtené síly nepřekročily předpisové hodnoty, jak bylo na začátku předpokládáno, a tak nemělo smysl dále provádět modifikaci tras řízení.

I přes výše uvedené byl proveden stručný návrh modifikace trasy řízení křidélek a výškového kormidla. V případě pedálů je rezerva řídicí síly tak velká, že by muselo být použito nereálně vysoké zatížení.

V závěru je provedena pevnostní kontrola tras řízení. V souladu s předpisem je třeba zvýšit vypočtená zatížení řídicích ploch. Síly v jednotlivých prvcích byly určeny při rozboru kinematiky a výpočet zvýšeného se snadno provede pouze změnou závěsových momentů. Z pevnostní kontroly vyplynulo, že trasy řízení jsou dostatečně naddimenzovány i pro vyšší vnější zatížení. Z toho lze usoudit, že bylo zřejmě od začátku vývoje letounu TL Stream očekáváno, že dojde k jeho modifikaci na vyšší letové výkony. Zvýšení přesnosti pevnostních výpočtů by bylo vhodné, zejména v případě různých pák, namáhaných ohybem a tahem, využít MKP kontrolu pro dosažení přesnějších výsledků a možnosti celý systém odlehčit.

Letoun TL Trainer je stále ve fázi koncepčního návrhu a během dalšího vývoje může dojít k podstatným změnám v konstrukci a aerodynamickém návrhu. Bylo tedy snahou nachystat algoritmus výpočtu v Excelu tak, aby jej výrobce mohl snadno použít i při případných změnách na letounu. Výhodou je, že výpočet zatížení kormidel závisí pouze na jejich tvaru, dále na plošném zatížení křídla a na maximálním kladném provozním násobku. Pouze změnou těchto hodnot lze výpočet modifikovat. Provedená analýza kinematiky řízení může být využita i při dalším vývoji letounu TL Stream.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *TL-ULTRALIGHT Aircraft* [online]. b.r. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <http://www.tl-ultralight.cz/>
- [2] *CERTIFIKAČNÍ SPECIFIKACE PRO LETOUNY KATEGORIE NORMÁLNÍ, CVIČNÁ, AKROBATICKÁ A PRO SBĚRNOU DOPRAVU CS-23*. Amdt. 3. 2012.
- [3] *UL-2 Část I*. Praha, 2002.
- [4] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu II: Letové vlastnosti*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-761-1.
- [5] *Stream: Pilot's operating handbook* [online]. b.r., , 96 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://www.tl-ultralight.cz/file/edee/prilohy/ke-stazeni/poh-stream-ul-na-web.pdf>
- [6] Stream - TL-ULTRALIGHT Aircraft. *TL-ULTRALIGHT Aircraft* [online]. 2017 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://www.tl-ultralight.cz/cs/ultralehka-letadla/stream>
- [7] *Certification Specifications for Normal-Category Aeroplanes CS-23: Amendment 5*. In: . 2017. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-23%20Amendment%205.pdf>
- [8] MYSZKA, David H. *Machines and mechanisms: applied kinematic analysis*. 4th ed. Boston: Prentice Hall, 2012. ISBN 978-0-13-215780-3.
- [9] ČTVERÁK, J., V. MERTL a A. PÍŠTĚK. *Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí*. Brno: Letecký ústav fakulty strojní VUT Brno, 1997.
- [10] VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I: Učební text*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2012.
- [11] PÍŠTĚK, A., O. GRÉGR a R. BÖHM. *Pevnost a životnost letadel I*. První. Brno: Rektorát VUT v Brně, 1988.
- [12] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIAM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Definice kladných směrů výchylek a sil (pozor, kladná výchylka řídidla způsobí zápornou výchylku příslušné řídicí plochy) [4]	13
Obr. 2.2: Definice některých rozměrů kormidla (značky rozměrů jsou v dalším textu doplněny o indexy příslušných kormidel).....	14
Obr. 3.1: Muška TL Trainer (převzato z TL Stream) [6]	15
Obr. 4.1: Rozložení průměrného tlakového w zatížení po ploše kormidla.....	19
Obr. 4.2: Rozložení tlakového zatížení po délce tětiny (a) - průměrné, (b) – modelové (pro případ křídélka)	20
Obr. 4.3: Určení výslednice modelového zatížení na tětině.....	20
Obr. 4.4: Výpočet velikosti výslednice liniového zatížení $q(y)$ – zatížení (a), rozměry (b)	21
Obr. 4.5: Výpočet polohy výslednice liniového zatížení $q(y)$	22
Obr. 4.6: Náčrt křídélka (pravé křídlo).....	23
Obr. 4.7: Definice rozměrů křídélka – tětiny (a), ostatní (b).....	23
Obr. 4.8: Řezy křídélka	24
Obr. 4.9: Modelové rozložení tlaku v řezu křídélka s uvažováním OP	24
Obr. 4.10: Vypočtená geometrie křídélka	26
Obr. 4.11: Průběh liniového zatížení po rozpětí křídélka a velikosti a působíště sil $L_{kř,i}$ (počátek s.s. odpovídá kořeni křídélka)	26
Obr. 4.12: Modelové rozložení tlaku v řezu vyvažovací plošky křídélka (bez uvažování OP)...	27
Obr. 4.13: Geometrie vyvažovací plošky křídélka.....	29
Obr. 4.14: Zatížení vyvažovací plošky křídélka.....	29
Obr. 4.15: Náčrt výškového kormidla (pravá strana).....	30
Obr. 4.16: Modelové rozložení tlaku po délce tětiny VK – trojúhelníkové (a), parabolické (b)	31
Obr. 4.17: Geometrie výškového kormidla (parabolické rozložení).....	33
Obr. 4.18: Zatížení výškového kormidla (počátek s.s. odpovídá kořeni, parabolické rozložení)	33
Obr. 4.19: Geometrie vyvažovací plošky VK	34
Obr. 4.20: Zatížení vyvažovací plošky VK (počátek s.s. odpovídá kořeni).....	35
Obr. 4.21: Náčrt směrového kormidla.....	36
Obr. 4.22: Vypočtená geometrie SK	37
Obr. 4.23: Rozložení zatížení na SK	37
Obr. 4.24: Náčrt profilu vztlakové klapky	38
Obr. 4.25: Spojení klapky a slotu v kořenové části (zelená – klapka, oranžová – slot).....	38
Obr. 4.26: Rozložení zatížení na klapce.....	38
Obr. 4.27: Modelové rozložení tlaku v řezu vyvažovací plošky křídélka (bez uvažování OP)...	39
Obr. 4.28: Kinematické schéma vysouvání klapky.....	40
Obr. 4.29: Výpočet síly působící na ozubený hřeben klapky.....	40
Obr. 5.1: Trasa řízení křidélek (pohled zprava, zezadu)	43
Obr. 5.2: Trasa řízení křídélka – uzel 1 (pohled zleva, zepředu)	43
Obr. 5.3: Člen ②, křídélko, geometrie.....	44
Obr. 5.4: Člen ②, křídélko, zatížení	44
Obr. 5.5: Členy ③, ④, ⑤, křídélko, geometrie.....	45
Obr. 5.6: Členy ③, ④ a ⑤, křídélko, zatížení.....	46
Obr. 5.7: Trasa řízení křídélka – uzel 2, část 1 (pohled v rovině yz)	47
Obr. 5.8: Trasa řízení křídélka – uzel 2, část 2 (pohled v rovině xy).....	47

Obr. 5.9: Člen ⑥, křídélko, geometrie.....	47
Obr. 5.10: Člen ⑥, křídélko, zatížení v rovině yz	47
Obr. 5.11: Člen ⑥, křídélko, zatížení v rovině xy	48
Obr. 5.12: Trasa řízení křídélka – uzel 3, levá strana (pohled zezadu, zprava)	48
Obr. 5.13: Trasa řízení křídélka – uzel 3, pravá strana (pohled zezadu, zprava)	48
Obr. 5.14: Členy ⑦ až ⑩ křídélko, geometrie	49
Obr. 5.15: Členy ⑪ a ⑫, křídélko, geometrie	49
Obr. 5.16: Členy ⑧ až ⑫, křídélko, pravá strana, zatížení.....	50
Obr. 5.17: Trasa řízení křídélek – uzel 4.....	51
Obr. 5.18: Člen ⑬, křídélko, geometrie.....	52
Obr. 5.19: Členy ⑭ a ⑮, křídélko, geometrie	52
Obr. 5.20: Členy ⑬ a ⑭, křídélko, zatížení.....	53
Obr. 5.21: Trasa řízení křídélek – uzel 3	53
Obr. 5.22: Členy ⑮, ⑯ a ⑰, křídélko, geometrie	54
Obr. 5.23: Členy ⑯ a ⑰, křídélko, zatížení.....	54
Obr. 5.24: Trasa řízení vyvažovací plošky pravého křídélka (pohled zleva, zezadu).....	55
Obr. 5.25: Členy ②, ③ a ④, vyvažovací ploška křídélka, geometrie (1:1).....	55
Obr. 5.26: Členy ②, ③ a ④, vyvažovací ploška křídélka, zatížení	55
Obr. 5.27: Trasa řízení VK (pohled zprava, zezadu).....	57
Obr. 5.28: Trasa řízení VK – uzel 1, část 2	58
Obr. 5.29: Trasa řízení VK – uzel 1, část 1, pravé výškové kormidlo	58
Obr. 5.30: Členy ②, ③ a ④, výškové kormidlo, geometrie	58
Obr. 5.31: Členy ②, ③ a ④, výškové kormidlo, geometrie	59
Obr. 5.32: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 2, část 1	60
Obr. 5.33: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 2, část 2	60
Obr. 5.34: Členy ④, ⑤ a ⑥, výškové kormidlo, geometrie	61
Obr. 5.35: Členy ④, ⑤ a ⑥, výškové kormidlo, zatížení.....	62
Obr. 5.36: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 3, část 1	63
Obr. 5.37: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 3, část 2	63
Obr. 5.38: Členy ⑦, ⑧ a ⑨, výškové kormidlo, geometrie	63
Obr. 5.39: Členy ⑦, ⑧ a ⑨, výškové kormidlo, zatížení.....	64
Obr. 5.40: Členy ⑩ a ⑪, výškové kormidlo, geometrie	65
Obr. 5.41: Členy ⑩ a ⑪, výškové kormidlo, zatížení.....	66
Obr. 5.42: Trasa řízení vyvažovací plošky výškového kormidla (pohled shora, zezadu).....	67
Obr. 5.43: Členy ②, ③ a ④, vyvažovací ploška výškového kormidla, geometrie (1:2)	67
Obr. 5.44: Trasa řízení SK (pohled zleva, zezadu)	68
Obr. 5.45: Trasa řízení směrového kormidla – uzel 1, část 1	69
Obr. 5.46: Trasa řízení směrového kormidla – uzel 1, část 2.....	69
Obr. 5.47: Členy ③ a ④, směrové kormidlo, geometrie	69
Obr. 5.48: Členy ② a ③, směrové kormidlo, zatížení.....	70
Obr. 5.49: Členy ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ a ⑨, směrové kormidlo, geometrie	70
Obr. 5.50: Členy ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ a ⑨, směrové kormidlo, zatížení.....	71
Obr. 5.51: Trasa řízení směrového kormidla – uzel 2	72
Obr. 5.52: Členy ⑧ a ⑩, směrové kormidlo, geometrie	72
Obr. 5.53: Členy ⑪, ⑭ a ⑮, směrové kormidlo, geometrie	73
Obr. 5.54: Členy ⑪, ⑭ a ⑮, výškové kormidlo, zatížení.....	74
Obr. 5.55: Trasa řízení výškového kormidla – uzel 3	75

Obr. 5.56: Členy ⑮ až ⑲, výškové kormidlo, geometrie.....	75
Obr. 5.57: Členy ⑮ až ⑲, směrové kormidlo, zatížení.....	76
Obr. 5.58: Trasa řízení klapky (pravé křídlo, zezadu).....	77
Obr. 6.1: Postup modifikace části řízení	78
Obr. 7.1: Průřezová plocha táhla.....	81
Obr. 7.2: Táhlo řízení zakončené jednoduchým okem.....	83
Obr. 7.3: Rozměry pro výpočet oka	83
Obr. 7.4: Sestava pák pedálu	85
Obr. 7.5: Páka řízení s připojeným táhlem.....	85
Obr. 7.6: Výpočet střižného čepu.....	87

SEZNAM TABULEK

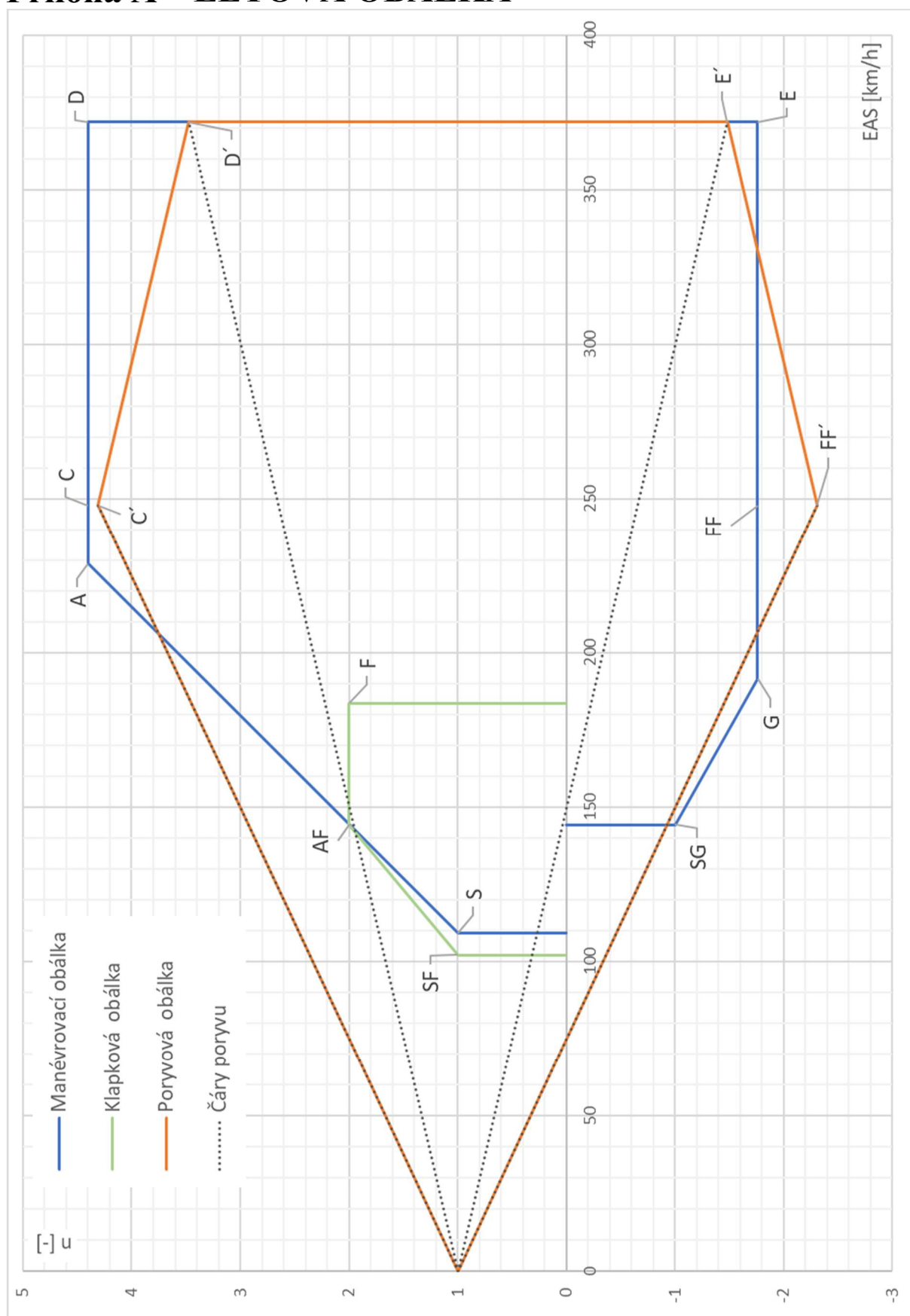
Tab. 3.1: Základní údaje o letounu.....	15
Tab. 4.1: Podmínky pro užití zjednodušených kritérií návrhových zatížení (část předpisu A23.1)	18
Tab. 4.2: Podmínky pro užití zjednodušených kritérií návrhových zatížení – zákazy (část předpisu A23.1)	18
Tab. 4.3: Základní parametry křídélka	23
Tab. 4.4: Základní parametry vyvažovací plošky křidélek	27
Tab. 4.5: Základní parametry VK	30
Tab. 4.6: Základní parametry jedné vyvažovací plošky výškového kormidla.....	34
Tab. 4.7: Základní parametry SK	36
Tab. 4.8: Základní parametry klapky	38
Tab. 4.9: Výpočet geometrie členu ② křídélka	40
Tab. 4.10: Výsledné síly působící na vztlačovou klapku.....	40
Tab. 4.11: Závěsové momenty jednotlivých kormidel.....	41
Tab. 5.1: Výpočet geometrie členu ② křídélka	44
Tab. 5.2: Výpočet zatížení členu ② křídélka.....	44
Tab. 5.3: Výpočet geometrie členů ③, ④ a ⑤ křídélka	45
Tab. 5.4: Výpočet zatížení členů ③, ④ a ⑤ křídélka.....	46
Tab. 5.5: Výpočet zatížení členu ⑥ křídélka.....	47
Tab. 5.6: Výpočet zatížení členu ⑥ křídélka v rovině yz.....	47
Tab. 5.7: Výpočet zatížení členu ⑥ křídélka v rovině xy.....	48
Tab. 5.8: Výpočet geometrie členů ⑪ a ⑫ křídélka.....	49
Tab. 5.9: Výpočet zatížení členů ⑧ až ⑫ křídélka.....	50
Tab. 5.10: Výpočet geometrie členů ⑬, ⑭ a ⑮ křídélka	52
Tab. 5.11: Výpočet zatížení členů ⑬, ⑭ a ⑮ křídélka	53
Tab. 5.12: Výpočet geometrie členů ⑯ a ⑰ křídélka.....	54
Tab. 5.13: Výpočet geometrie členů ⑯ a ⑰ křídélka.....	54
Tab. 5.14: Výpočet zatížení členů ②, ③ a ④ vyvažovací plošky křídélka	56
Tab. 5.15: Výpočet geometrie členů ②, ③ a ④ výškového kormidla.....	59
Tab. 5.16: Výpočet zatížení členů ②, ③ a ④ výškového kormidla	59
Tab. 5.17: Výpočet geometrie členů ④, ⑤ a ⑥ výškového kormidla.....	61
Tab. 5.18: Výpočet zatížení členů ④, ⑤ a ⑥ výškového kormidla	62
Tab. 5.19: Výpočet geometrie členů ⑦, ⑧ a ⑨ výškového kormidla.....	64
Tab. 5.20: Výpočet zatížení členů ⑦, ⑧ a ⑨ výškového kormidla	64
Tab. 5.21: Výpočet geometrie členů ⑩ a ⑪ křídélka.....	65
Tab. 5.22: Výpočet zatížení členů ⑩ a ⑪ výškového kormidla	66
Tab. 5.23: Výpočet zatížení členů ③ a ④ výškového kormidla	69
Tab. 5.24: Výpočet zatížení členů ③ a ④ směrového kormidla	70
Tab. 5.25: Výpočet geometrie členů ④ a ⑤ směrového kormidla.....	71
Tab. 5.26: Výpočet geometrie členů ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ a ⑨ směrového kormidla.....	71
Tab. 5.27: Výpočet geometrie a zatížení členu ⑩ výškového kormidla	72
Tab. 5.28: Výpočet geometrie členů ⑪ a ⑮ směrového kormidla.....	73
Tab. 5.29: Výpočet zatížení členů ⑪, ⑭ a ⑮ výškového kormidla	74

Tab. 5.30: Výpočet zatížení členů ⑩ až ⑲ výškového kormidla.....	76
Tab. 5.31: Geometrie a zatížení vztlakové klapky	77
Tab. 5.32: Výsledná zatížení řídidel.....	77
Tab. 6.1: modifikované rozměry řízení křidélek.	79
Tab. 7.1: Maximální síly od pilota pro určení největšího zatížení tras řízení [2]	80
Tab. 7.2: Vlastnosti materiálu táhel – dural 2014 [9].....	80
Tab. 7.3: Výsledky pevnostní kontroly trubkových táhel (horní hodnota je pro tah, dolní pro tlak).....	82
Tab. 7.4: Výsledky pevnostní kontroly tyčových táhel (horní hodnota je pro tah, dolní pro tlak)	82
Tab. 7.5: Materiál ok a vidlic	83
Tab. 7.6: Vlastnosti materiálu čepů – ocel L-W6H.6 [9]	84
Tab. 7.7: Únosnost kloubových ložisek	84
Tab. 7.8: Únosnost ocelových lan	86
Tab. 7.9: Výsledné bezpečnosti pro trasu řízení klapky.....	88

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A – Letová obálka
- Příloha B – Těžiště a obsah pravoúhlého lichoběžníku
- Příloha C – Rozměry řídicích ploch
- Příloha D – Výsledky zatížení řídicích ploch
- Příloha E – Výsledky řešení tras řízení
- Příloha F – Podklady pro výpočet ok a vidlic
- Příloha G – Výsledky pevnostní kontroly

Příloha A – LETOVÁ OBÁLKA



Obr. A.1: Letová obálka

Tab. A.1: Letová obálka – rychlosti

Návrhová rychlost	Bod obálky	Hodnota	
		[km/h]	[m/s]
Let na břiše			
pádová	S	109,1	30,3
obratová	A	228,8	63,6
cestovní	C, C', FF, FF'	247,9	68,9
strmý let	D, D', E, E'	371,8	103,3
Let na zádech			
pádová	SG	144,3	40,1
obratová	G	191,5	53,2
Vysunuté klapky			
pádová	SF	102,1	28,3
obratová	AF	144,3	40,1
maximální	F	183,7	51,0

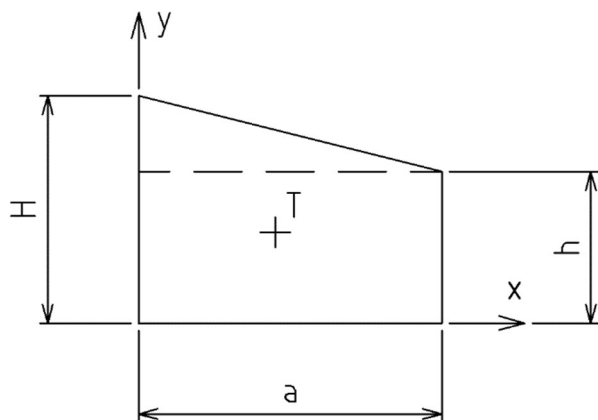
Tab. A.2: Letová obálka – násobky

Násobek	Označení	Hodnota [-]
max. kladný	n ₁	4,40
max. záporný	n ₂	-1,76
s klapkami	n _F	2,00
při kladném poryvu (nahoru) a V _C	n _{VC+}	4,31
při záporném poryvu (dolů) a V _C	n _{VC-}	-2,31
při kladném poryvu (nahoru) a V _D	n _{VD+}	3,48
při záporném poryvu (dolů) a V _D	n _{VD-}	-1,48

Pozn.: Součinitele vztlaku jsou určeny pomocí dat z letové příručky TL Stream [5], dle následujícího vztahu pro hodnoty TL Stream:

$$C_L = \frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot S \cdot V^2}$$

Příloha B – TĚŽIŠTĚ A OBSAH PRAVOÚHLÉHO LICHOBĚŽNÍKA



Obr. B.1: Pravoúhlý lichoběžník

Výsledné vztahy

$$x_T = \frac{a}{3} \cdot \frac{H + 2 \cdot h}{H + h} \quad (C.1)$$

$$y_T = \frac{H^2 + h^2 + H \cdot h}{3 \cdot (H + h)} \quad (C.2)$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot a \cdot (H + h) \quad (C.3)$$

Pozn.: Vztah pro obsah odpovídá vztahu pro numerickou integraci lichoběžníkovou metodou.

Odvození

x_T :

$$\begin{aligned} x_T &= \frac{a \cdot h \cdot \frac{a}{2} + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (H - h) \cdot \frac{1}{3} \cdot a}{a \cdot h + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (H - h)} = \frac{\frac{a^2 \cdot h}{2} + \frac{a^2 \cdot (H - h)}{6}}{a \cdot \left(h + \frac{H - h}{2}\right)} = \frac{a^2}{2} \cdot \frac{h + \frac{H}{3} + \frac{h}{3}}{a \cdot \left(\frac{H}{2} + \frac{h}{2}\right)} = \\ &= \frac{a}{2} \cdot \frac{\frac{H + 2 \cdot h}{3}}{\frac{H + h}{2}} = \frac{a}{3} \cdot \frac{H + 2 \cdot h}{H + h} \end{aligned}$$

y_T :

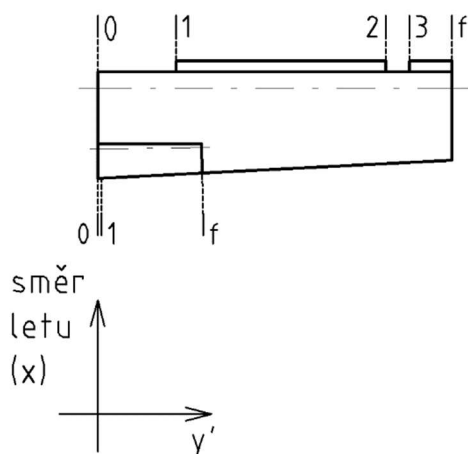
$$\begin{aligned} y_T &= \frac{a \cdot h \cdot \frac{h}{2} + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (H - h) \cdot \left[h + \frac{1}{3} \cdot (H - h)\right]}{a \cdot h + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (H - h)} = \frac{\frac{a}{2} \cdot [h^2 + (H - h) \cdot \left(\frac{H}{3} + \frac{2 \cdot h}{3}\right)]}{\frac{a}{2} \cdot (2 \cdot h + H - h)} = \\ &= \frac{h^2 + \frac{H^2}{3} + \frac{2 \cdot H \cdot h}{3} - \frac{H \cdot h}{3} - \frac{2 \cdot h^2}{3}}{H + h} = \frac{\frac{H^2}{3} + \frac{3 \cdot h^2 - 2 \cdot h^2}{3} + \frac{2 \cdot H \cdot h - H \cdot h}{3}}{H + h} = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \frac{H^2 + h^2 + H \cdot h}{H + h} \end{aligned}$$

S :

$$S = a \cdot h + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (H - h) = a \cdot h + \frac{a \cdot H}{2} - \frac{a \cdot h}{2} = \frac{a \cdot H}{2} + \frac{a \cdot h}{2} = \frac{a}{2} \cdot (H + h)$$

Příloha C – ROZMĚRY ŘÍDICÍCH PLOCH

Křídélka



Obr. C.1: Definice řezů křídélka a jeho vyvažovací plošky (pravé křídlo)

Tab. C.1: Rozměry křídélka

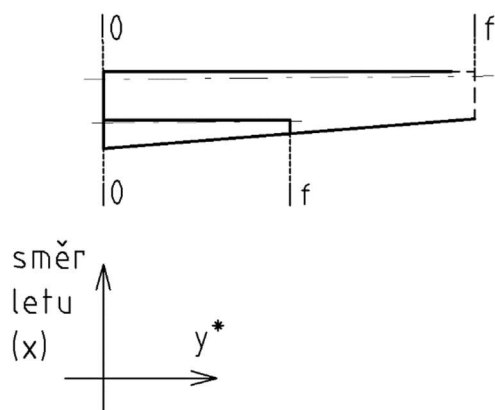
Řez [-]	y' [mm]	$c_{kř}$ [mm]	$c_{OP,kř}$ [mm]	$r_{kř}$ [mm]
0	0	282	0	43
1	204	-	0	-
2	757	-	32	-
3	822	-	0	-
f	934	234	32	36

Tab. C.2: Rozměry vyvažovací plošky křídélka

Řez [-]	y [mm]	c [mm]	c_{OP} [mm]	r [mm]
0	0	91	0	12
1	15	-	0	-
f	0	91	5	9

Pozn.: Vynechané hodnoty v tabulkách jsou v dalším postupu dopočteny lineární interpolací.

Výškové kormidlo



Obr. C.2: Definice řezů výškového kormidla a jeho vyvažovací plošky (pravá strana)

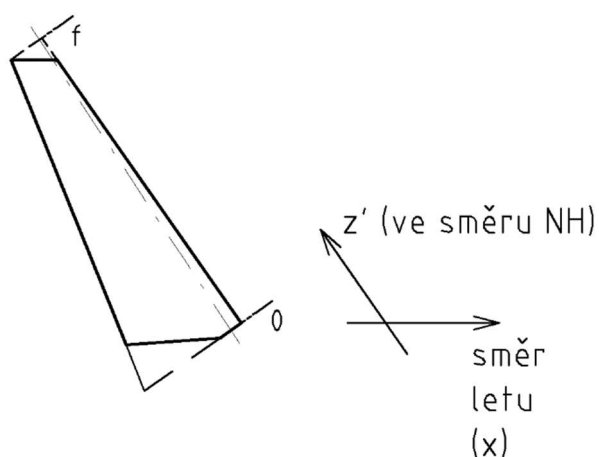
Tab. C.3: Rozměry výškového kormidla

Řez [-]	y^* [mm]	c [mm]	r [mm]
0	0	305	32
f	1468	179	18

Tab. C.4: Rozměry vyvažovací plošky výškového kormidla

Řez [-]	y^* [mm]	c [mm]	r [mm]
0	0	114	11
f	700	55	5

Směrové kormidlo

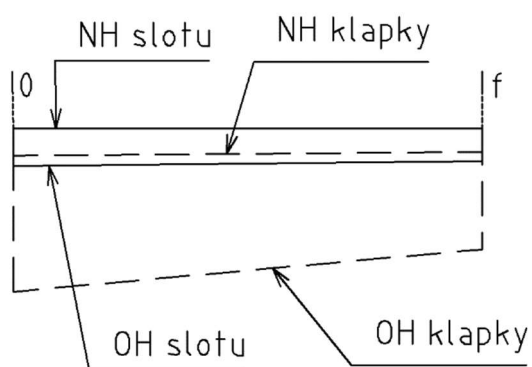


Obr. C.3: Definice řezů směrového kormidla

Tab. C.5: Rozměry směrového kormidla

Řez [-]	z' [mm]	c [mm]	r [mm]
0	0	467	51
f	1346	134	13

Klapky



Obr. C.4: Definice řezů vztlakové klapky (pravé křídlo)

Tab. C.6: Rozměry klapky

Řez [-]	y' [mm]	c_{kl} [mm]	c_{sl} [mm]	vzdál NH [mm]
0	0	270	90	53
f	1965	200	70	39

Příloha D – VÝSLEDKY ZATÍŽENÍ ŘÍDICÍCH PLOCH

Křídélka

Tab. D.1: Průměrné tlakové zatížení křidélek

$\bar{W}_{kř}$
[lb/ft ²] [Pa]
34 1615

Tab. D.2: Výpočet zatížení křidélek, část 1

i	$y'_{kř,i}$	$c_{kř,i}$	$c_{OP,kř,i}$	$c'_{kř,i}$	$r_{kř,i}$	$r'_{kř,i}$	$q_{kř,i}$	$r'_{q,kř,i}$	$r_{q,kř,i}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N/m]	[m]	[m]
0	0,000	0,282	0,000	0,282	0,043	0,043	455	0,096	0,096
1	0,204	0,272	0,000	0,272	0,0415	0,041	438	0,092	0,092
	0,204	0,272	-0,032	0,304	0,0415	0,073	490	0,106	0,074
2	0,757	0,243	-0,032	0,275	0,0373	0,069	444	0,096	0,064
	0,757	0,243	0,000	0,243	0,0373	0,037	393	0,083	0,083
3	0,822	0,240	0,000	0,240	0,0368	0,037	387	0,082	0,082
	0,822	0,240	-0,032	0,272	0,0368	0,069	439	0,095	0,063
f	0,934	0,234	-0,032	0,266	0,036	0,068	430	0,093	0,061

Tab. D.3: : Výpočet zatížení křidélek, část 2

i	$L_{kř,i}$	$\Delta y'_{L,kř,i}$	$y'_{L,kř,i}$	$r_{L,kř,i}$	$r_{kř}(y'_{L,kř,i})$	$h_{kř,i}$	$H_{kř,i}$
[-]	[N]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N·m]
0	91	0,101	0,101	0,094	0,042	0,052	4,7
1	258	0,272	0,476	0,069	0,039	0,030	7,7
2	25	0,032	0,789	0,082	0,037	0,045	1,1
3	49	0,056	0,878	0,062	0,036	0,026	1,3
f							
Σ	423						14,8

Vyvažovací ploška křidélek

Tab. D.4: Průměrné tlakové zatížení vyvažovací plošky křidélek

$\bar{W}_{VP,kř}$	
[lb/ft ²]	[Pa]
56	2703

Tab. D.5: Výpočet zatížení vyvažovací plošky křidélek

i	$y'_{VP,kř,i}$	$c_{VP,kř,i}$	$r_{VP,kř,i}$	$w^*_{VP,kř,i}$	$q_{VP,kř,i}$	$r_{q,VP,kř,i}$	$L_{VP,kř}$	$y_{L,VP,kř}$	$r_{L,VP,kř}$	$r_{VP,kř}(y'_{L,VP,kř})$	$h_{VP,kř,i}$	$H_{VP,kř,i}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[Pa]	[N/m]	[m]	[N]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N·m]
0	0,000	0,092	0,012	1802	249	0,041	62	0,133	0,037	0,011	0,027	<u>1,7</u>
f	0,274	0,076	0,009	1802	205	0,034						

Výškové kormidlo

Tab. D.6: Průměrné tlakové zatížení výškového kormidla

\bar{W}_{VK}	
[lb/ft ²]	[Pa]
43	2080

Tab. D.7: Výpočet zatížení výškového kormidla – trojúhelníkové rozložení, část 1

i	$y^*_{VK,i}$	$c_{VK,i}$	$c_{VOP,i}$	$c_{VK,i}/c_{VOP,i}$	$r_{VK,i}$	$r_{q,VOP,i}/c_{VOP,i}$ (odhad)	$w^*_{VK,i}$	$q_{VK,i}$	$r_{q,VK,i}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]	[Pa]	[N/m]	[m]
0	0,000	0,305	0,796	0,383	0,032	0,300	1178	180	0,102
f	1,465	0,180	0,440	0,409	0,018	0,300	1286	116	0,060

Tab. D.8: Výpočet zatížení výškového kormidla – trojúhelníkové rozložení, část 2

i	L_{VK}	$y^*_{L,VK}$	$r_{L,VK}$	$r_{VK}(y^*_{L,VK})$	h_{VK}	H_{VK}
[-]	[N]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N·m]
0	216	0,680	0,082	0,026	0,057	12,3
f						

Tab. D.9: Výpočet zatížení výškového kormidla – parabolické rozložení

i	$y^*_{VK,i}$	$c_{VK,i}$	$r_{VK,i}$	$q_{VK,i}$	$r_{q,VK,i}$	L_{VK}	$y^*_{L,VK}$	$r_{L,VK}$	$r_{VK}(y^*_{L,VK})$	h_{VK}	H_{VK}
[-]	[m]	[m]	[m]	[N/m]	[m]	[N]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N·m]
0	0,000	0,305	0,032	634	0,076	560	0,572	0,064	0,037	0,027	14,9
f	1,465	0,180	0,018	130	0,045						

Vyvažovací plošky výškového kormidla

Tab. D.10: Průměrné tlakové zatížení vyvažovacích plošek výškového kormidla

$\bar{w}_{VP,VK}$
[lb/ft ²] [Pa]
56 2703

Tab. D.11: Výpočet zatížení vyvažovacích plošek výškového kormidla

i	$y^*_{VP,VK,i}$	$c_{VP,VK,i}$	$r_{VP,VK,i}$	$w^*_{VP,kř,i}$	$q_{VP,kř,i}$	$r_{q,VP,kř,i}$	$L_{VP,kř}$	$y_{L,VP,kř}$	$r_{L,VP,kř}$	$r_{VP,kř}(y'_{L,VP,kř})$	$h_{VP,kř,i}$	$H_{VP,kř,i}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[Pa]	[N/m]	[m]	[N]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N·m]
0	0,000	0,113	0,011	1802	305	0,050	159	0,310	0,039	0,008	0,030	4,8
f	0,700	0,055	0,005	1802	149	0,024						

Směrové kormidlo

Tab. D.12: Průměrné tlakové zatížení směrového kormidla

\bar{w}_{VK}
[lb/ft ²] [Pa]
39 1850

Tab. D.13: Výpočet zatížení směrového kormidla – trojúhelníkové rozložení, část 1

i	$z'_{SK,i}$	$c_{SK,i}$	$c_{SOP,i}$	$c_{SK,i}/c_{SOP,i}$	$r_{SK,i}$	$r_{q,SOP,i}/c_{SOP,i}$ (odhad)	$w^*_{SK,i}$	$q_{SK,i}$	$r_{q,SK,i}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]	[Pa]	[N/m]	[m]
0	0,000	0,465	0,988	0,471	0,052	0,300	1372	319	0,155
f	1,329	0,125	0,267	0,468	0,015	0,300	1362	85	0,042

Tab. D.14: Výpočet zatížení výškového kormidla – trojúhelníkové rozložení, část 2

i	L_{SK}	$y^*_{L,SK}$	$r_{L,SK}$	$r_{SK}(y^*_{L,SK})$	h_{SK}	H_{SK}
[-]	[N]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N·m]
0	269	0,536	0,109	0,037	0,072	19,4
f						

Tab. D.15: Výpočet zatížení výškového kormidla – parabolické rozložení

i	$z'_{SK,i}$	$c_{SK,i}$	$r_{SK,i}$	$q_{SK,i}$	$r_{q,SK,i}$	L_{SK}	$y^*_{L,SK}$	$r_{L,SK}$	$r_{SK}(y^*_{L,SK})$	h_{SK}	H_{SK}
[-]	[m]	[m]	[m]	[N/m]	[m]	[N]	[m]	[m]	[m]	[m]	[N·m]
0	0,000	0,465	0,052	860	0,116	583	0,451	0,087	0,065	0,023	13,3
f	1,329	0,125	0,015	17	0,031						

Vztlakové klapky

Tab. D.16: Průměrné tlakové zatížení vztlakových klapek

\bar{w}_{kl}
[lb/ft ²] [Pa]
46 2218

Tab. D.17: Výpočet zatížení vztlakových klapek – část slot

i	$y'_{sl,i}$	$c_{sl,i}$	$w^*_{sl,i}$	$q_{sl,i}$	L_{sl}
[-]	[m]	[m]	[Pa]	[N/m]	[N]
0	0,000	0,095	1478	211	360
f	1,965	0,070	1478	155	

Tab. D.18: Výpočet zatížení vztlakových klapek – část klapka

i	$y'_{kl,i}$	$c_{kl,i}$	$w^*_{kl,i}$	$q_{kl,i}$	L_{kl}
[-]	[m]	[m]	[Pa]	[N/m]	[N]
0	0,000	0,270	1478	599	1024
f	1,965	0,200	1478	444	

Tab. D.19: Výsledné síly působící na vztlakové klapky

L_{kl}	F_1	L_{sl}	F_2	F_3
[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
1024	543	360	50	493

Příloha E – VÝSLEDKY ŘEŠENÍ TRAS ŘÍZENÍ

Křídélka

$\delta_{kř} = 0^\circ$				$\delta_{kř} = 12^\circ$				$\delta_{kř} = -25^\circ$			
Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení	
②											
	[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]
b ₀	<u>62,7</u>	H _{kř}	<u>14825</u>	b ₀	<u>62,7</u>	H _{kř}	<u>14825</u>	b ₀	<u>62,7</u>	H _{kř}	<u>-14825</u>
a	62,3		[N]	a	62,3		[N]	a	62,3		[N]
b	62,7	F ₁	236	b	65,7	F ₁	226	b	65,7	F ₁	-226
c ₀	7,1			c ₀	7,1			c ₀	7,1		
c	7,1			c	20,8			c	-20,8		
c ₁	0,0			c ₁	13,7			c ₁	-27,9		
	[°]				[°]				[°]		
α	<u>6,5</u>			α	<u>6,5</u>			α	<u>6,5</u>		
β	<u>0,0</u>			β	<u>12,0</u>			β	<u>-25,0</u>		
③											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
d ₀	30,4	F ₁	236	d ₀	30,4	F ₁	226	d ₀	30,4	F ₁	-226
d	30,4			d	30,4			d	2,5		
e	<u>44,5</u>			e	<u>44,5</u>			e	<u>44,5</u>		
	[°]				[°]				[°]		
γ ₀	<u>43,1</u>			γ ₀	<u>43,1</u>			γ ₀	<u>43,1</u>		
γ	43,1			γ	83,0			γ	3,2		
γ ₁	0,0			γ ₁	39,9			γ ₁	-39,9		
④											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
h	<u>55,0</u>	F _{2M}	191	h	<u>55,0</u>	F _{2M}	183	h	<u>55,0</u>	F _{2M}	-183
f	0,0	F ₂	191	f	35,3	F ₂	252	f	-35,3	F ₂	-183
g	0,0	F _{2T}	0	g	12,8	F _{2T}	174	g	12,8	F _{2T}	-12
	[°]				[°]				[°]		
ζ	90,0			ζ	46,5			ζ	86,3		
⑤											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
i	200,0	F ₂	191	i	200,0	F ₂	252	i	200,0	F ₂	-183
k	200,0			k	199,6			k	199,6		
j	0,0			j	34,9			j	-34,9		
	[°]				[°]				[°]		
ε	0,0			ε	3,7			ε	3,7		
⑥											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
l ₀	<u>854,9</u>	F ₂	191	l ₀	<u>854,9</u>	F ₂	252	l ₀	<u>854,9</u>	F ₂	-183
l	854,9	F _{3T}	191	l	889,8	F _{3T}	251	l	820,0	F _{3T}	-183
m ₀	<u>1665,7</u>	F _{3M}	0	m ₀	<u>1665,7</u>	F _{3M}	16	m ₀	<u>1665,7</u>	F _{3M}	-12
m	1665,7	F _{3N}	28	m	1700,6	F _{3N}	36	m	1630,8	F _{3N}	-23
n	<u>1796,0</u>	F ₃	193	n	<u>1796,0</u>	F ₃	254	n	<u>1796,0</u>	F ₃	-184
	[°]	F _{H1}	0		[°]	F _{H1}	18		[°]	F _{H1}	-12
ε	0,0	F _{H2}	33	ε	3,7	F _{H2}	40	ε	3,7	F _{H2}	-28
		F _H	33			F _H	44			F _H	31

	F_{G1}	0		F_{G1}	34		F_{G1}	-24
	F_{G2}	5		F_{G2}	4		F_{G2}	-5
	F_G	5		F_G	34		F_G	24
⑦								
o	[mm]		[N]	o	[mm]		[N]	
	<u>772,2</u>	F_3	193		<u>772,2</u>	F_3	254	
q	<u>43,6</u>			q	<u>43,6</u>			
	[°]				[°]			
η_0	<u>8,4</u>			η_0	<u>8,4</u>		θ_0	<u>8,4</u>
η_1	<u>8,1</u>			η_1	<u>8,1</u>		θ_1	<u>8,1</u>
η_2	<u>7,3</u>			η_2	<u>7,3</u>		θ_2	<u>7,3</u>
η	8,4			η	8,1		θ	7,3
⑧								
p	[mm]		[N]	p	[mm]		[N]	
	69,5	F_{4M}	193		69,5	F_{4M}	221	
	[°]	F_{4T}	0		[°]	F_{4T}	125	
θ_0	<u>90,0</u>			θ_0	<u>90,0</u>		θ_0	<u>90,0</u>
θ_1	<u>60,5</u>			θ_1	<u>60,5</u>		θ_1	<u>60,5</u>
θ_2	<u>121,0</u>			θ_2	<u>121,0</u>		θ_2	<u>121,0</u>
θ	90,0			θ	60,5		θ	121,0
l_0	<u>0,0</u>			l_0	<u>0,0</u>		l_0	<u>0,0</u>
l_1	<u>29,9</u>			l_1	<u>29,9</u>		l_1	<u>29,9</u>
l_2	<u>-29,9</u>			l_2	<u>-29,9</u>		l_2	<u>-29,9</u>
l	0,0			l	29,9		l	-29,9
⑩ pravá strana								
r	[mm]		[N]	r	[mm]		[N]	
	49,6	F_{5M}	271		49,6	F_{5M}	258	
	[°]	F_{5T}	0		[°]	F_{5T}	148	
l	0,0	F_5	271	l	29,9	F_5	297	
				l	-29,9	F_5		-357
⑪								
t	[mm]		[N]	t	[mm]		[N]	
	47,5	F_{6M}	566		47,5	F_{6M}	592	
u	0,0	F_{6T}	0	u	6,3	F_{6T}	328	
v	0,0	F_6	566	v	23,7	F_6	677	
	[°]				[°]			
κ	0,0			κ	0,9		κ	0,9
λ	0,0			λ	29,0		λ	-29,0
⑫								
w	[mm]		[N]	w	[mm]		[N]	
	387,0	F_6	566		387,0	F_6	677	
x	387,0			x	386,9			
y	0,0			y	23,7			
				y	-23,7			
⑬								
z	[mm]		[N]	z	[mm]		[N]	
	40,0	F_6	566		40,0	F_6	677	
a'	0,0	F_{7M}	566	a'	7,8	F_{7M}	537	
	[°]	F_{7T}	0		[°]	F_{7T}	413	
μ	0,0			μ	36,4		μ	-36,4
v	0,0			v	1,2		v	1,2
ρ	0,0			ρ	37,5		ρ	-37,5
⑭								

	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
b'	40,0	F _{8M}	566	b'	40,0	F _{8M}	537	b'	40,0	F _{8M}	-537
c'	0,0	F _{8T}	0	c'	7,8	F _{8T}	372	c'	7,8	F _{8T}	372
d'	0,0	F ₈	566	d'	23,7	F ₈	653	d'	-23,7	F ₈	-653
	[°]				[°]				[°]		
μ	0,0			μ	36,4			μ	-36,4		
σ	0,0			σ	34,7			σ	-34,7		
(15)											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
e'	271,0	F ₈	566	e'	271,0	F ₈	653	e'	271,0	F ₈	-653
g'	271,0			g'	270,9			g'	270,9		
f'	0,0			f'	23,8			f'	-23,8		
	[°]				[°]				[°]		
μ	0,0			μ	36,4			μ	-36,4		
ξ	0,0			ξ	1,6			ξ	1,6		
(16)											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
j'	40,0	F ₈	566	j'	40,0	F ₈	653	j'	40,0	F ₈	-653
h'	0,0	F _{9M}	566	h'	7,9	F _{9M}	513	h'	7,9	F _{9M}	-513
	[°]	F _{9T}	0		[°]	F _{9T}	404		[°]	F _{9T}	404
φ	0,0			φ	36,6			φ	-36,6		
τ	0,0			τ	1,7			τ	1,7		
χ	0,0			χ	38,3			χ	-38,3		
(17)											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
k'	180	F ₁₀	126	k'	180	F ₁₀	114	k'	180	F ₁₀	-114

Vyvažovací ploška křidélek

$\delta_{VP,kř} = 0^{\circ}$				$\delta_{VP,kř} = 12^{\circ}$				$\delta_{VP,kř} = -25^{\circ}$			
Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení	
(2)											
[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]	
a	<u>27</u>	$H_{VP,kř}$	<u>1673</u>	a	<u>27</u>	$H_{VP,kř}$	<u>1673</u>	a	<u>27</u>	$H_{VP,kř}$	<u>-1673</u>
[°]		[N]		[°]		[N]		[°]		[N]	
$\delta_{VP,kř}$	<u>0</u>	F_{1M}	62	$\delta_{VP,kř}$	<u>12</u>	F_{1M}	62	$\delta_{VP,kř}$	<u>-25</u>	F_{1M}	-62
α	<u>19,0</u>	F_{1T}	21	α	<u>5,6</u>	F_{1T}	6	α	<u>41,8</u>	F_{1T}	-55
		F_1	66			F_1	62			F_1	-83
(4)											
[°]		[N]		[°]		[N]		[°]		[N]	
β	<u>25,0</u>	F_1	66	β	<u>23,6</u>	F_1	62	β	<u>22,8</u>	F_1	-83
		F_{2M}	28			F_{2M}	25			F_{2M}	-32
		F_{2T}	59			F_{2T}	57			F_{2T}	-77

Výškové kormidlo

$\delta_{VK}=0^\circ$				$\delta_{VK}=0^\circ$				$\delta_{VK}=0^\circ$			
Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení	
②											
	[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]
a	<u>92,0</u>	H_{VK}	<u>14910</u>	a	<u>92,0</u>	H_{VK}	<u>14910</u>	a	<u>92,0</u>	H_{VK}	<u>-14910</u>
d	<u>664,6</u>		[N]	d	<u>664,6</u>		[N]	d	<u>664,6</u>		[N]
e_0	699,5	F_{1M}	162	e_0	699,5	F_{1M}	162	e_0	699,5	F_{1M}	-162
e=BD	699,5	F_{1T}	52	e=BD	660,9	F_{1T}	-17	e=BD	731,2	F_{1T}	-142
	[°]	F_1	170		[°]	F_1	163		[°]	F_1	-216
α	<u>0,0</u>			α	<u>25,0</u>			α	<u>-25,0</u>		
β	1,0			β	-0,2			β	2,4		
ζ_0	<u>108,7</u>			ζ_0	<u>108,7</u>			ζ_0	<u>108,7</u>		
ζ	108,7			ζ	83,7			ζ	133,7		
η	17,7			η	-6,1			η	41,3		
④											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
c	<u>100,0</u>	F_2	340	c	<u>100,0</u>	F_2	326	c	<u>100,0</u>	F_2	-431
j_0	1620,6	F_{2M}	339	j_0	1620,6	F_{2M}	291	j_0	1620,6	F_{2M}	-418
j=CF	1620,6	F_{2T}	26	j=CF	1582,4	F_{2T}	147	j=CF	1655,4	F_{2T}	107
h	<u>1640,5</u>	F_{3M}	339	h	<u>1640,5</u>	F_{3M}	291	h	<u>1640,5</u>	F_{3M}	-418
	[°]	F_{3T}	88		[°]	F_{3T}	232		[°]	F_{3T}	39
γ_0	85,6	F_3	350	γ_0	85,6	F_3	372	γ_0	85,6	F_3	-420
γ	85,6			γ	63,1			γ	104,3		
ε_0	86,7			ε_0	86,7			ε_0	86,7		
ε	86,7			ε	62,9			ε	106,7		
$\Delta\varepsilon$	0,0			$\Delta\varepsilon$	23,7			$\Delta\varepsilon$	-20,0		
θ_0	<u>76,8</u>			θ_0	<u>76,8</u>			θ_0	<u>76,8</u>		
θ	76,8			θ	53,1			θ	96,8		
ι	-1,4			ι	-1,7			ι	-1,5		
⑥											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
g	<u>60</u>	F_3	350	g	<u>60</u>	F_3	372	g	<u>60</u>	F_3	-420
	[°]	F_{4M}	343		[°]	F_{4M}	208		[°]	F_{4M}	-389
κ_0	78,2	F_{4T}	72	κ_0	78,2	F_{4T}	309	κ_0	78,2	F_{4T}	159
κ	78,2			κ	34,0			κ	112,2		
λ_0	76,8			λ_0	76,8			λ_0	76,8		
λ	76,8			λ	32,3			λ	110,7		
$\Delta\lambda$	0,0			$\Delta\lambda$	44,5			$\Delta\lambda$	-33,8		
⑦											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
k	<u>60,0</u>	F_{5M}	343	k	<u>60,0</u>	F_{5M}	208	k	<u>60,0</u>	F_{5M}	-389
m=FJ	<u>713,9</u>	F_{5T}	42	m=FJ	<u>713,9</u>	F_{5T}	283	m=FJ	<u>713,9</u>	F_{5T}	186
n_0	692,7	F_5	346	n_0	692,7	F_5	351	n_0	692,7	F_5	-431
n=GJ	692,7			n=GJ	658,9			n=GJ	727,6		
	[°]				[°]				[°]		
μ_0	<u>67,0</u>			μ_0	<u>67,0</u>			μ_0	<u>67,0</u>		
μ	67,0			μ	22,5			μ	100,8		
ν	15,9			ν	13,9			ν	14,7		
σ	67,0			σ	-22,0			σ	134,7		

⑨											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
q	<u>137,2</u>	F ₅	346	q	<u>137,2</u>	F ₅	351	q	<u>137,2</u>	F ₅	-431
	[°]	F _{6T}	-34		[°]	F _{6T}	53		[°]	F _{6T}	159
ξ ₀	95,6	F _{6M}	344	ξ ₀	95,6	F _{6M}	347	ξ ₀	95,6	F _{6M}	-400
ξ	95,6			ξ	81,3			ξ	111,7		
ρ ₀	<u>110,8</u>			ρ ₀	<u>110,8</u>			ρ ₀	<u>110,8</u>		
ρ	110,8			ρ	95,1			ρ	126,4		
Δρ	0,0			Δρ	15,6			Δρ	-15,6		
⑩											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
r	<u>270</u>	F _{7M}	175	r	<u>270</u>	F _{7M}	176	r	<u>270</u>	F _{7M}	-204
s	0,0	F _{7T}	0	s	10,0	F _{7T}	51	s	10,0	F _{7T}	56
t	0,0	F ₇	175	t	72,8	F ₇	183	t	-72,8	F ₇	-211
	[°]				[°]				[°]		
Δρ	0,0			Δρ	15,6			Δρ	-15,6		
⑪											
	[mm]		[N]		[mm]		[N]		[mm]		[N]
u	<u>1409,8</u>	F ₇	175	u	<u>1409,8</u>	F ₇	183	u	<u>1409,8</u>	F ₇	-211
v	1409,8			v	1337,0			v	1482,6		
	[°]				[°]				[°]		
σ	0,0			σ	0,4			σ	0,4		

Vyvažovací plošky VK

$\delta_{VP,VK} = 0^{\circ}$				$\delta_{VP,VK} = 0^{\circ}$				$\delta_{VP,VK} = 0^{\circ}$			
Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení		Geometrie		Zatížení	
②											
[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]		[mm]		[N·mm]	
a	<u>26</u>	H _{VP,kř}	<u>4843</u>	a	<u>26</u>	H _{VP,kř}	<u>4843</u>	a	<u>26</u>	H _{VP,kř}	<u>-4843</u>
[°]		[N]		[°]		[N]		[°]		[N]	
$\delta_{VP,kř}$	<u>0</u>	F _{1M}	186	$\delta_{VP,kř}$	<u>17,5</u>	F _{1M}	186	$\delta_{VP,kř}$	<u>-22,5</u>	F _{1M}	-186
α	<u>9,0</u>	F _{1T}	29	α	<u>8,8</u>	F _{1T}	29	α	<u>30,8</u>	F _{1T}	-111
		F ₁	189			F ₁	188			F ₁	-217
④											
[°]		[N]		[°]		[N]		[°]		[N]	
β	<u>9,0</u>	F ₁	377	β	<u>8,6</u>	F ₁	377	β	<u>8,3</u>	F ₁	-434
		F _{2M}	59			F _{2M}	56			F _{2M}	-63
		F _{2T}	373			F _{2T}	373			F _{2T}	-429

Směrové kormidlo

$$\delta_{SK} = 30^\circ$$

Geometrie				Zatížení		Geometrie				Zatížení		Geometrie				Zatížení	
③						④						⑤					
		[mm]		[N·mm]				[mm]		[N]				[mm]		[N]	
a		<u>35,0</u>	H_{SK}	<u>19384</u>		d		<u>253,0</u>	F_1	647		g		<u>40,0</u>	F_1	647	
b		4,7		[N]		f		253,0				h		4,0	F_{2M}	577	
c		17,5	F_{1M}	554		e		17,5						[°]	F_{2T}	291	
		[°]	F_{1T}	334				[°]				γ		<u>25,9</u>			
α		<u>30,0</u>	F_1	647		β		<u>1,1</u>									
						δ		0,9									
⑥, ⑦						⑩						⑪					
		[mm]		[N]				[mm]		[N]				[mm]		[N]	
j		<u>45,0</u>	F_{3M}	513		m		<u>35,0</u>	F_3	557		n		<u>29,0</u>	F_{4M}	<u>673</u>	
		[°]	F_{3T}	218				[°]				r		<u>439,1</u>	F_{4T}	874	
ζ ₀		<u>0,0</u>	F_3	557		ε		<u>32,6</u>				s ₀		434,8	F_4	1103	
ζ		<u>23,0</u>										s		419,9			
														[°]			
												η ₀		<u>79,6</u>			
												η		47,0			
												θ		9,4			
⑮						⑯, ⑱						⑲					
		[mm]		[N]				[mm]		[N]				[mm]		[N]	
q		<u>50,0</u>	F_4	<u>1103</u>					F_{6M}	<u>1153</u>		u		<u>133,0</u>	F_7	433	
		[°]	F_{5T}	321					F_{6T}	371							
l ₀		<u>90,0</u>	F_{5M}	1153					F_6	1211							
l		73,1															
K ₀		100,3															
K		82,5															
ΔK		17,8															

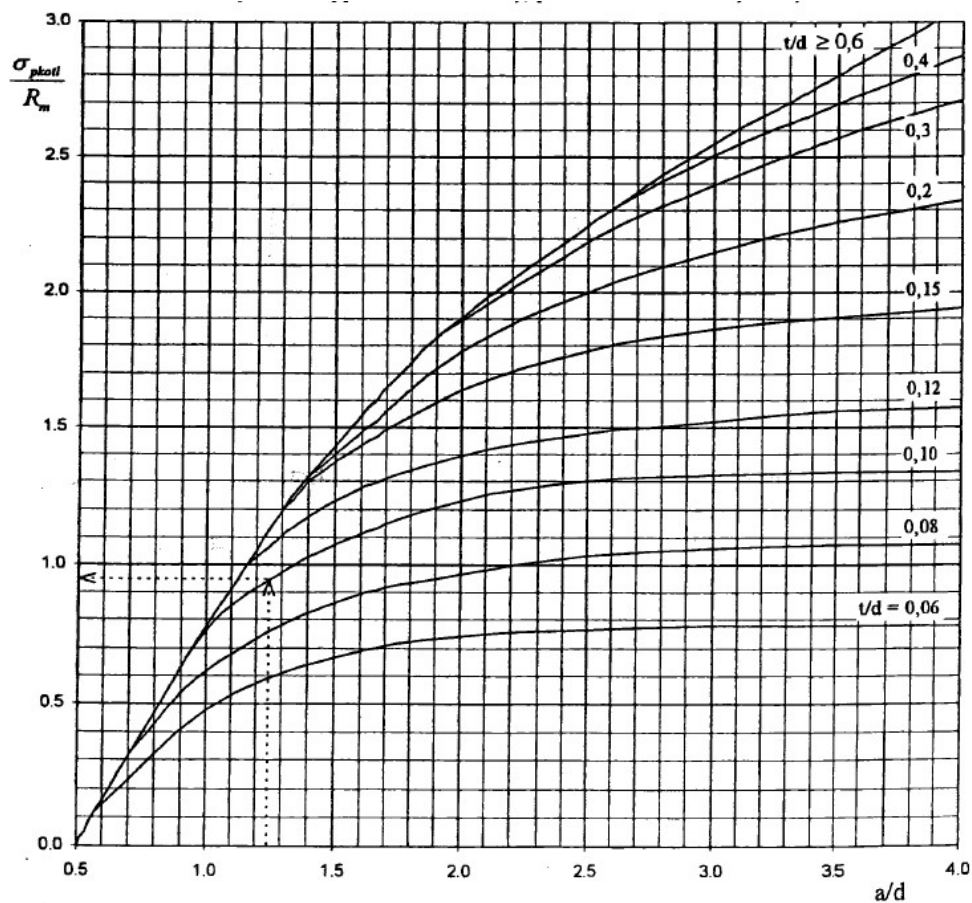
Příloha F – PODKLADY PRO VÝPOČET OK A VIDLIC

- f_1 - vliv tloušťky t oka a vzdálenosti otvoru od okraje oka, viz. graf v tabulce Výpočet oka III.
- f_2 - vliv dovolené deformace oka za předpokladu, že se oko při zatížení na 75 % únosnosti může deformovat na nejbližší vyšší toleranci, tj. z H7 na H8, z H8 na H11 apod., viz. graf v tabulce Výpočet oka IV.
- f_3 - vliv vůle dovolené při výrobě, viz. Výpočet oka III.
- f_4 - vliv druhu zatížení a významu části draku letounu.

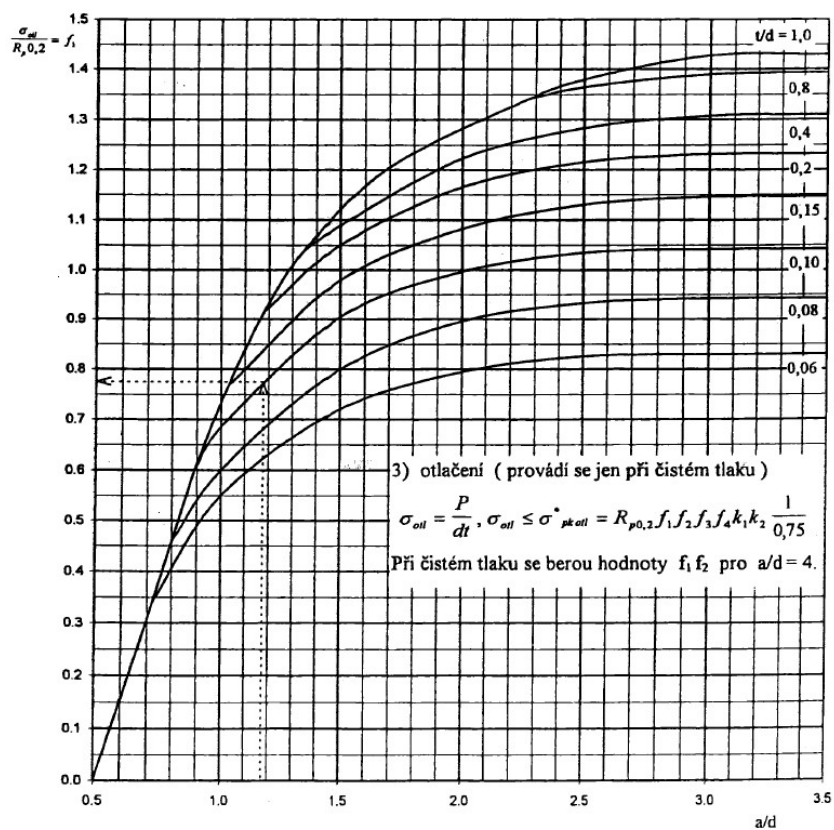
f_4	Druh zatížení a část draku letounu
1	Nerozebíratelné svorníky a upevňovací šrouby, zřídka rozebírané spojovací kování křidel.
0,8	Závěsy klapek, rozebíratelné spoje vystavené vibracím, motorová lože.
0,7	Spoje pohyblivé při pohybu nezatížené - přistávací zařízení a části řízení.
0,6	Spoje pohyblivé a zatížené při pohybu - přistávací zařízení, řízení, závěsy kormidel.

- k_1 - vliv zúžení za okem, daný poměrem šířek b_1/b .
 $k_1 = 0,9$ pro $b_1/b = 0,5$, mezilehlé hodnoty se interpolují.
- k_2 - vliv směru působení síly P na oko.
 $k_2 = 0,9$ při směru síly kolmo na osu souměrnosti oka,
 $k_2 = 1$ při směru síly ve směru osy souměrnosti oka.

Obr. F.1: Určení některých koeficientů



Obr. F.2: Graf pro určení $\sigma_{pk,otl}$



Obr. F.3: Graf pro určení koeficientu f_1

Příloha G – VÝSLEDKY PEVNOSTNÍ KONTROLY

Tab. G.1: Výsledky pevnostní kontroly táhel – trubková táhla

	d	D	s	S'	l	J _{min}	n	d ₁	S	F	$\sigma_{\text{tah/tlak}}$	$k_{\text{tah/tlak}}$	$\lambda_{\text{m,red}}$	λ	λ_{red}	ok?	F _{kr,Eul}	k _{Eul}	$\sigma_{\text{kr,Tet}}$	F _{kr,Tet}	k _{Tet}
	[mm]			[mm ²]	[mm]	[mm ⁴]	[-]	[mm]	[mm ²]	[N]	[Mpa]	[-]	[-]	[-]	[-]		[N]	[-]	[Mpa]	[N]	[-]
Křídélka																					
⑤	8	10	1	28,3		290	0	0,0	28,3	895	31,6	7,1									
	8	10	1	28,3	200,0	290	0	0,0	28,3	-648	-22,9	9,8	56,2	62,5	62,5	ok	5148,6	7,9			
⑥	13	16	1,5	68,3		1815	2	5,0	53,3	893	16,7	13,4									
	13	16	1,5	68,3	811,0	1815	2	5,0	62,3	-648	-10,4	21,6	56,2	150,3	150,3	ok	1961,0	3,0			
⑦	12	14	1	40,8		868	1	4,0	36,8	902	24,5	9,2									
	12	14	1	40,8	772,2	868	1	4,0	36,8	-654	-17,7	12,7	56,2	159,1	159,1	ok	1034,2	1,6			
⑨	12	14	1	40,8		868	1	4,0	36,8	1055	28,6	7,9									
	12	14	1	40,8	650,0	868	1	4,0	36,8	-1269	-34,4	6,5	56,2	133,9	133,9	ok	1459,7	1,2			
⑫	12	14	1	40,8		868	1	4,0	36,8	2405	65,3	3,4									
	12	14	1	40,8	387,0	868	1	4,0	36,8	-2405	-65,3	3,4	56,2	79,7	79,7	ok	4117,8	1,7			
⑮	12	14	1	40,8		868	1	4,0	36,8	2320	63,0	3,6									
	12	14	1	40,8	271,0	868	1	4,0	36,8	-2320	-63,0	3,6	56,2	55,8	55,8	!			387,1	14259,7	6
VK																					
③	12	14	1	40,8		868	1	4,0	36,8	898	24,4	9,2									
	12	14	1	40,8	700,0	868	1	4,0	36,8	-1139	-30,9	7,3	56,2	144,2	144,2	ok	1258,6	1,1			
⑤	27	30	1,5	134,3		13674	1	4,0	128,3	1966	15,3	14,7									
	27	30	1,5	134,3	1631,8	13674	1	4,0	128,3	-2218	-17,3	13,0	56,2	158,1	158,1	ok	3649,1	1,6			
⑧	19	22	1,5	96,6		5102	1	4,0	90,6	1854	20,5	11,0									
	19	22	1,5	96,6	665,6	5102	1	4,0	90,6	-2277	-25,1	9,0	56,2	88,7	88,7	ok	8183,5	3,6			
⑪	38	40	1	122,5		23310	2	25,0	72,5	969	13,4	16,8									
	38	40	1	122,5	1409,8	23310	2	25,0	72,5	-1114	-15,4	14,6	56,2	78,6	78,6	ok	8334,1	7,5			
SK																					

④	6,8	10	1,6	42,2		386	0	0,0	42,2	1991	47,2	4,8								
	6,8	10	1,6	42,2	253,0	386	0	0,0	42,2	-1991	-47,2	4,8	52,1	83,7	83,7	ok	4284,4	2,2		
⑬	12	14	1	40,8		868	1	4,0	36,8	3397	92,2	2,4								
	12	14	1	40,8	431,7	868	1	4,0	36,8	-3397	-92,2	2,4	52,1	88,9	88,9	ok	3309,2	1,0		

Tab. G.2: Výsledky pevnostní kontroly táhel – tyčová táhla

	d	l	J _{min}	S	F	R _{p0,2}	R _m	E	σ _{tah/tlak}	k _{tah/tlak}	λ _{m,red}	λ	λ _{red}	ok?	F _{kr,Eul}	k _{Eul}	σ _{kr,Tet}	F _{kr,Tet}	k _{Tet}
	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ²]	[N]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[-]	[-]	[-]	[-]		[N]	[-]	[Mpa]	[N]	[-]
VP křídélek																			
③	3	51	4,0	7,1	-83,1	225	390	72000	-11,8	19,1	56,2	68	68	ok	1086,3	13,1			
VP VK																			
③	5	173	30,7	19,6	-216,8	225	390	72000	-11,0	20,4	56,2	138,4	138,4	ok	728,4	3,4			
④	10	81	490,9	78,5	-433,7	225	390	72000	-5,5	40,7	56,2	32,4	32,4	!	53165,8	122,6	387,1	30400	70,1

Tab. G.3: Výsledky pevnostní kontroly ok a vidlic

spoj	člen	F	a	b	b ₁	c	d	h	t	a/d	t/d	S ₁	S ₂	f1	f2	f3	f4	k1	k2	σ	k
		[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm ²]	[mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[Mpa]	[-]
křídélko																					
②-③	③	840	14	27	27	4	19	4	7	0,7	0,3	52,0	123,5	0,37	1	1	0,6	1	0,9	18,6	24,8
④-⑤	④	895	11	22	22	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	1	0,95	25,7	17,9
	⑤	895	7,5	15	14	5	5	5	4	1,5	0,8	40,0	20,0	1,05	1	1	0,6	0,99	1	25,7	17,9
⑤-⑥	⑥	895	8	16	13	4	8	4	4	1,0	0,5	32,0	32,0	0,73	1	1	0,6	0,97	0,95	32,2	14,3
⑥-⑦	⑥	895	9	18	16	6	6	6	4	1,5	0,7	48,0	24,0	1,08	1	1	0,6	0,96	0,95	21,4	21,5
	⑦	902	11	22	8	4	14	4	4,4	0,8	0,3	35,2	61,6	0,45	1	1	0,6	0,85	0,95	29,5	15,6
⑦-⑧	⑦	902	9	18	16	6	6	6	4	1,5	0,7	48,0	24,0	1,08	1	1	0,6	0,85	1	21,6	21,3
	⑧	902	11	22	22	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	1	0,95	25,9	17,7
⑨-⑩	⑨	1269	9	18	12	6	6	6	8	1,5	1,3	96,0	48,0	1,15	1	1	0,6	0,88	1	15,2	30,3

	⑩	1269	11	22	22	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	1	0,95	36,5	12,6
⑪-⑫	⑪	2405	11	22	22	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	1	0,95	69,1	6,7
	⑫	2405	9	18	12	6	6	6	8	1,5	1,3	96,0	48,0	1,15	1	1	0,6	0,88	1	28,8	16,0
⑫-⑬	⑬	2405	11	22	22	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	1	0,95	69,1	6,7
⑭-⑮	⑭	2320	11	22	22	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	1	0,95	66,7	6,9
	⑮	2320	9	18	12	6	6	6	8	1,5	1,3	96,0	48,0	1,15	1	1	0,6	0,88	1	27,8	16,6
⑮-⑯	⑮	2320	11	22	22	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	1	0,95	66,7	6,9
	⑯	2320	9	18	12	6	6	6	8	1,5	1,3	96,0	48,0	1,15	1	1	0,6	0,88	1	27,8	16,6
VP kř																					
②-③	②	83	3,5	7	7	2	3	2	3	1,2	1,0	12,0	9,0	0,93	1	1	0,6	1	0,95	8,0	57,7
	③	83	2	4	3	1	2	1	3	1,0	1,5	6,0	6,0	0,73	1	1	0,6	0,98	1	15,9	28,9
③-④	③	83	2	4	3	0,5	3	0,5	3	0,7	1,0	3,0	9,0	0,3	1	1	0,6	0,95	1	31,9	14,4
	④	83	5	10	10	3,5	3	3,5	1,5	1,7	0,5	10,5	4,5	1,11	1	1	0,6	1	0,95	9,1	50,5
VK																					
②-③	②	1139	15	30	30	8	14	8	5	1,1	0,4	80,0	70,0	0,85	1	1	0,6	1	0,95	16,4	28,1
	③	1139	9	18	12	6	6	6	8	1,5	1,3	96,0	48,0	1,15	1	1	0,6	0,95	1	13,6	33,7
③-⑤	③	1139	11	22	8	4	14	4	4,4	0,8	0,3	35,2	61,6	0,45	1	1	0,6	0,85	1	37,2	12,4
	⑤	2218	10	20	20	7	6	7	8	1,7	1,3	112,0	48,0	1,2	1	1	0,6	1	1	22,8	20,2
⑤-⑥	⑤	2218	11	22	4	4	14	4	4	0,8	0,3	32,0	56,0	0,45	1	1	0,6	1	0,9	79,7	5,8
	⑥	2218	6,5	13	13	3,5	6	3,5	3	1,1	0,5	21,0	18,0	0,85	1	1	0,6	1	0,8	121,4	3,8
⑦-⑧	⑦	2277	6,5	13	13	3,5	6	3,5	3	1,1	0,5	21,0	18,0	0,85	1	1	0,6	1	0,8	124,7	3,7
	⑧	2277	11	22	22	4	14	4	4,4	0,8	0,3	35,2	61,6	0,45	1	1	0,6	1	1	74,4	6,2
⑧-⑨	⑧	2277	11	22	6	4	14	4	4,4	0,8	0,3	35,2	61,6	0,45	1	1	0,6	0,85	1	74,4	6,2
	⑨	2277	8	16	16	5	6	5	4,4	1,3	0,7	44,0	26,4	0,9	1	1	0,6	1	0,95	59,5	7,7
⑩-⑪	⑩	1114	11	22	14	4	14	4	4,4	0,8	0,3	35,2	61,6	0,45	1	1	0,6	0,9	0,9	36,4	12,6
	⑪	1114	9	18	18	6	6	6	6	1,5	1,0	72,0	36,0	1,1	1	1	0,6	1	0,9	17,8	25,8
VP VK																					
②-③	②	217	10	20	20	6,5	7	6,5	4	1,4	0,6	52,0	28,0	1,05	1	1	0,6	1	0,9	4,8	95,9
	③	217	5	10	4	2,5	5	2,5	4	1,0	0,8	20,0	20,0	0,75	1	1	0,6	0,9	1	12,5	36,9

③-④	③	217	10	20	4	3	14	3	4	0,7	0,3	24,0	56,0	0,3	1	1	0,6	1	1	10,4	44,3
	④	217	11	22	5	3,5	15	3,5	5	0,7	0,3	35,0	75,0	0,3	1	1	0,6	1	0,9	7,1	64,6
SK																					
③-④	③	1991	8,5	17	17	6	5	6	4	1,7	0,8	48,0	20,0	1,15	1	1	0,6	1	0,9	47,7	9,6
	④	1991	11	22	8	4	14	4	4,4	0,8	0,3	35,2	61,6	0,46	1	1	0,6	1	1	65,1	7,1
④-⑤	⑤	1991	7,5	15	15	4,5	6	4,5	5	1,3	0,8	45,0	30,0	0,97	1	1	0,6	1	0,9	50,9	9,0
⑥-⑧	⑥	1717	7,5	15	15	4,5	6	4,5	5	1,3	0,8	45,0	30,0	0,97	1	1	0,6	1	0,9	43,9	10,5
⑩-⑭	⑭	3397	11	22	22	4	14	4	4,4	0,8	0,3	35,2	61,6	0,45	1	1	0,6	1	1	111,0	4,1
⑯-⑰	⑰	3730	11	22	14	4	14	4	5	0,8	0,4	40,0	70,0	0,45	1	1	0,6	0,95	1	107,2	4,3

Tab. G.4: Výsledky pevnostní kontroly ok a vidlic, dokončení

spoj	člen	σ_{otl} [Mpa]	$\sigma_{pk,otl}$ [Mpa]	k	σ_{pk} [Mpa]	k	$\sigma^*_{pk,otl}$ [Mpa]	k	S_{ϵ} [mm ²]	τ [Mpa]	k
křídélko											
②-③	③	6,8	138	20,3	172,0	9,3	86,6	12,7	284	3,0	93,2
④-⑤	④	12,8	138	10,8	181,5	7,1	111,2	8,7	154	5,8	47,5
	⑤	44,7	138	3,1	189,2	7,4	270,3	6,0	20	45,6	6,1
⑤-⑥	⑥	28,0	138	4,9	176,1	5,5	174,9	6,3	50	17,8	15,5
⑥-⑦	⑥	37,3	138	3,7	174,3	8,1	256,1	6,9	28	31,6	8,7
	⑦	14,6	138	9,4	154,3	5,2	94,5	6,5	154	5,9	47,1
⑦-⑧	⑦	37,6	138	3,7	162,4	7,5	238,7	6,4	28	31,9	8,7
	⑧	12,9	138	10,7	181,5	7,0	111,2	8,6	154	5,9	47,1
⑨-⑩	⑨	26,4	138	5,2	168,2	11,1	263,1	10,0	28	44,9	6,2
	⑩	18,1	138	7,6	181,5	5,0	111,2	6,1	154	8,2	33,5
⑪-⑫	⑪	34,4	138	4,0	181,5	2,6	111,2	3,2	154	15,6	17,7
	⑫	50,1	138	2,8	168,2	5,8	263,1	5,3	28	85,0	3,2
⑫-⑬	⑬	34,4	138	4,0	181,5	2,6	111,2	3,2	154	15,6	17,7
⑭-⑮	⑭	33,1	138	4,2	181,5	2,7	111,2	3,4	154	15,1	18,3
	⑮	48,3	138	2,9	168,2	6,1	263,1	5,4	28	82,1	3,4
⑮-⑯	⑮	33,1	138	4,2	181,5	2,7	111,2	3,4	154	15,1	18,3
	⑯	48,3	138	2,9	168,2	6,1	263,1	5,4	28	82,1	3,4
VP kř											
②-③	②	9,2	138	14,9	181,5	22,8	229,7	24,9	7	11,8	23,5
	③	13,9	138	10,0	187,3	11,8	186,0	13,4	3	26,5	10,4
③-④	③	9,2	138	14,9	181,5	5,7	74,1	8,0	7	11,8	23,5
	④	18,5	138	7,5	181,5	19,9	274,2	14,8	7	11,8	23,5
VK											
②-③	②	16,3	138	8,5	181,5	11,1	210,0	12,9	154	7,4	37,3
	③	23,7	138	5,8	181,5	13,3	284,1	12,0	28	40,3	6,8
③-⑤	③	18,5	138	7,5	162,4	4,4	99,5	5,4	154	7,4	37,3
	⑤	46,2	138	3,0	191,1	8,4	312,0	6,8	28	78,4	3,5
⑤-⑥	⑤	39,6	138	3,5	172,0	2,2	105,3	2,7	154	14,4	19,2
	⑥	123,2	138	1,1	152,9	1,3	176,8	1,4	28	78,4	3,5
⑦-⑧	⑦	126,5	138	1,1	152,9	1,2	176,8	1,4	28	80,5	3,4
	⑧	37,0	138	3,7	191,1	2,6	117,0	3,2	154	14,8	18,7
⑧-⑨	⑧	37,0	138	3,7	162,4	2,2	99,5	2,7	154	14,8	18,7
	⑨	86,2	138	1,6	181,5	3,05	222,3	2,6	28	80,5	3,4
⑩-⑪	⑩	18,1	138	7,6	154,8	4,3	94,8	5,2	154	7,2	38,1
	⑪	30,9	138	4,5	172,0	9,7	257,4	8,3	28	39,4	7,0
VP VK											
②-③	②	7,7	138	17,8	172,0	35,9	245,7	31,7	38	5,6	49,0
	③	10,8	138	12,7	172,0	13,8	175,5	16,2	20	11,0	25,0
③-④	③	3,9	138	35,6	191,1	18,4	78,0	20,1	154	1,4	195,9
	④	2,9	138	47,7	172,0	24,1	70,2	24,3	177	1,2	224,9

SK											
③-④	③	99,6	138	1,4	172,0	3,6	269,1	2,7	20	101,4	2,7
	④	32,3	138	4,3	191,1	2,9	119,6	3,7	154	12,9	21,3
④-⑤	⑤	66,4	138	2,1	172,0	3,4	227,0	3,4	28	70,4	3,9
⑥-⑧	⑥	57,2	138	2,4	172,0	3,9	227,0	4,0	28	60,7	4,5
⑩-⑭	⑭	55,1	138	2,5	191,1	1,7	117,0	2,1	154	22,1	12,5
⑯-⑰	⑰	53,3	138	2,6	181,5	1,7	111,2	2,1	154	24,2	11,4

Tab. G.5: Výsledky pevnostní kontroly kroucených táhel - táhla

	d	D	M _k	W _k	τ _k	R _m	τ _{dov}	k ₁
trubky	[mm]	[mm]	[Nmm]	[mm ³]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[-]
⑥	14	18	10345	726	14,2	255	153	10,7
⑦	25	30	13301	2745	4,8	255	153	31,6

Tab. G.6: Výsledky pevnostní kontroly kroucených táhel - čepy

	d	r	S	M _k	F	τ _k	R _m	τ _{dov}	k ₂
čepy	[mm]	[mm]	[mm ²]	[Nmm]	[N]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[-]
② - ⑥	5	7	19,6	10345	1478	75,3	640	384	5,1
④ - ⑥	5	7	19,6	10345	1478	75,3	640	384	5,1
④ - ⑦	5	12,5	19,6	13301	1064	54,2	640	384	7,1
⑦ - motor	5	14	19,6	13301	950	48,4	640	384	7,9

Tab. G.7: Výsledky pevnostní kontroly kroucených táhel - ozubení

	l	b	h	S	W _o	F	σ	R _{p0,2}	R _m	k _o	τ _{dov}	τ _k	k _s
ozubení	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ³]	[N]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[-]	[Mpa]	[Mpa]	[-]
②	4,5	3	3,7	11,1	6,8	493	323,9	390	640	1,2	384	44,4	8,7
③	4,5	8	4,6	36,8	28,2	493	78,6	390	640	5,0	384	13,4	28,7
④	4,5	3,8	4	15,2	10,1	493	218,8	390	640	1,8	384	32,4	11,8
⑤	4,5	8	4,6	36,8	28,2	493	78,6	390	640	5,0	384	13,4	28,7

Tab. G.8: Výsledky pevnostní kontroly trubkových pák

	d	D	l	F	W _y	σ	R _{p0,2}	k
SK	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[mm ³]	[Mpa]	[Mpa]	[-]
⑮	18	20	50	3551	270	657	640	0,97
⑯, ⑰	18	20	50	3551	270	657	640	0,97
⑱	18	20	133	1335	270	657	640	0,97

Tab. G.9: Výsledky pevnostní kontroly plochých pák

	l	b	h	d	n	D	F	W_o	σ	k	F_i	τ	k
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[mm ³]	[Mpa]	[-]	[N]	[MPa]	[-]
křídélka													
③	27	4	26	4	6	18	840	451	50	7,8	210	16,7	23,0
④	37	5	26	4	6	18	679	563	45	8,7	233	18,5	20,7
⑩	54	5	26	4	6	17	2104	563	202	1,9	1114	88,6	4,3
⑪	30	5	23	4	6	17	2104	441	143	2,7	619	49,2	7,8
⑬	23	5	22	4	6	18	2010	403	115	3,4	428	34,1	11,3
⑭	23	5	22	4	6	18	2010	403	115	3,4	428	34,1	11,3
VP kříd													
②	19	3	12	3	2	8	62	72	16	23,8	74	10,4	36,9
VK				4	6								
②	72	5	45	5	6	20	856	1688	37	10,7	514	26,2	14,7
VP VK													
②	20	4	20	9	1	17	186	267	14		219	3,4	111,5